



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 1 (169) 2018

ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Issue 1 (169) 2018

Москва, 2018



**"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"

Слово редактора 4

Разработка и конструирование

М. А. Королев, Ю. А. Чаплыгин, А. С. Ключников, Д. И. Ефимова
Планарный КНИ беспереходной МОП-транзистор 5–14

Д. В. Тельпухов, А. И. Деменева, Т. Д. Жукова, Н. С. Хрущев
Исследование и разработка систем автоматизированного
проектирования схем функционального контроля
комбинационных логических устройств 15–22

Г. Н. Панин
Мемристивные двумерные электронные системы – новый тип
логических переключателей и памяти 23–41

Процессы и технология

Г. Я. Красников, О. П. Гущин, М. В. Литаврин, Е. С. Горнев
Некоторые аспекты самосовмещенного мультипаттернирования
в иммерсионной литографии 42–53

Р. К. Яфаров, В. Я. Шаныгин
Влияние микроволновой плазмохимической обработки на
морфологию и автоэмиссионные свойства кристаллов кремния 54–58

Математическое моделирование

**Г. Я. Красников, В. В. Бардушкин, Д. А. Карташов,
А. А. Кочетыгов, Ю. И. Шиляева, В. Б. Яковлев**
Эффективные упругие характеристики анодного оксида
алюминия с нитевидными порами, заполненными
поливинилиденфторидом 59–63

В. И. Анисимкин, Э. Верона, Н. В. Воронова
Расчет температурных профилей испарения микрокапель
жидкости с поверхности твердотельных стержней 64–67

Надежность

**Г. Я. Красников, А. С. Лушников, В. Д. Мещанов, Е. С. Рыбалко,
Н. Н. Фомичева, Н. А. Шелепин**
Исследование сбоеустойчивости СОЗУ с функцией исправления
одиночных сбоев при воздействии ТЗЧ 68–76

Журнал включен Всероссийской аттестационной комиссией (ВАК)
в число изданий, рекомендованных для публикации статей соискателей
ученых степеней кандидата и доктора наук №1969

"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 Zapadnyy 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, Y. A. Chaplygin, A. S. Klyuchnikov, D. I. Efimova
Planar SOI junctionless MOSFET 5–14

D. V. Telpukhov, A. I. Demeneva, T. D. Zhukova, N. S. Khrushchev
The research and development of automation systems for the
concurrent error detection combinational circuits 15–22

G. N. Panin
Memristive electronic systems – a new type of electronic logic
switches and memory 23–41

Processes and Technology

G. Ya. Krasnikov, O. P. Gushchin, M. V. Litavrin, E. S. Gornev
Some aspects of self-aligned multipatterning in immersion
lithography 42–53

R. K. Yafarov, V. Ya. Shanygin
Influence of microwave plasma-chemical processing on morphology
and field emission properties of crystals of silicon 54–58

Mathematical simulation

**G. Ya. Krasnikov, V. V. Bardushkin, D. A. Kartashov,
A. A. Kochetygov, Yu. I. Shilyaeva, V. B. Yakovlev**
Effective elastic characteristics of the anodic alumina having
threadlike pores filled with polyvinylidene fluoride 59–63

V. I. Anisimkin, E. Verona, N. V. Voronova
The temperature profile calculation for micro-droplet evaporation
from solid rod 64–67

Reliability

**G. Ya. Krasnikov, A. S. Lushnikov, V. D. Meschanov, E. S. Rybalko,
N. N. Fomicheva, N. A. Shelepin**
Study of the fault tolerance of SRAM with the function of correcting
single event upsets caused by heavy ions 68–76

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)

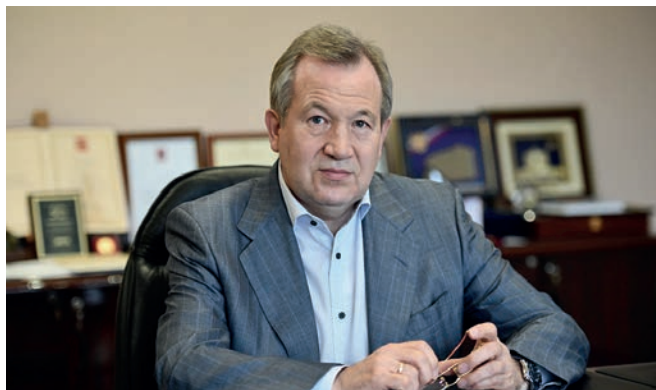
УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Вашему вниманию предлагается очередной, 14-й выпуск, научно-технического издания «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника». Редакционная коллегия, работая над этим номером, исходила из желания представить коллегам на примере обзорных и специализированных статей актуальные вопросы исследований по следующим научным направлениям: разработка и конструирование, процессы и технология, математическое моделирование, надежность. В числе авторов обзоров и оригинальных работ представлены как ученые, так и молодые исследователи, в том числе студенты и аспиранты вузов. В статьях тематически отражены научные направления, а также те задачи, которые становятся или уже стали актуальными в последние годы в развитии этих научных направлений.

В данном номере журнала представлено восемь оригинальных статей. Статьи очень разные. Они носят фундаментальный и прикладной характер, отражают направления использования тех или иных научных исследований и разработок.

Блок «Разработка и конструирование» представлен разработкой структурной модели планарного КНИ МОП БПТ; созданием программного комплекса для автоматизации проектирования схем функционального контроля логических устройств; обзором новых резистивных переключателей и памяти на основе атомарных двумерных кристаллов.

В блоке «Процессы и технология» были рассмотрены методы поочередного создания взаимодействующих друг друга микрорисунков с использованием согласованных между собой фотошаблонов для формирования линий и контактных окон; исследовано влияние плазмохимической модификации поверхности на автоэмиссионные свойства кристаллов кремния.



В следующем блоке «Математическое моделирование» решается задача численного моделирования эффективных упругих характеристик композитов типа нановолокна поливинилиденфторида в матрице анодного оксида алюминия; также решается стандартная задача теплопроводности применительно к испарению капель летучих соединений с поверхности однородного изотропного стержня с теплоизолированными боковыми стенками.

Заключительный блок «Надежность» представлен результатами исследования сбоеустойчивости СОЗУ с функцией исправления одиночных сбоев при воздействии ТЗЧ.

Редакция надеется, что предложенные материалы окажутся полезными для заинтересованных читателей и будут способствовать появлению новых идей и вариантов сотрудничества.

До новых встреч, уважаемые авторы и читатели, на страницах нашего журнала!

*С уважением,
главный редактор журнала,
д.т.н., профессор, академик РАН*

Г. Я. Красников

ПЛАНАРНЫЙ КНИ БЕСПЕРЕХОДНОЙ МОП-ТРАНЗИСТОР

► М. А. Королев¹, Ю. А. Чаплыгин¹, А. С. Ключников², Д. И. Ефимова¹

¹НИУ МИЭТ, ²АО «НИИМЭ»

Беспереходные МОП-транзисторы (МОП БПТ) обладают рядом преимуществ перед традиционными с точки зрения простоты конструкции, технологии изготовления и снижения влияния короткоканальных эффектов на характеристики прибора. Однако известные экспериментальные нанопроволочные МОП БПТ, из-за возникновения паразитного биполярного транзистора в закрытом состоянии, имеют высокие подпороговые токи. С целью решения этой проблемы в данной работе представлены структурная модель планарного КНИ МОП БПТ по нормам технологии 90 нм, маршрут математического моделирования, и с использованием приборно-технологического моделирования в среде TCAD исследовано влияние расположения контактов сток / истоковых областей и концентрации примеси в пленке кремния КНИ МОП БПТ на пороговое напряжение, токи насыщения и подпороговые токи. В результате исследования обнаружен и объяснен новый короткостокковый эффект. Он проявляется под влиянием ОПЗ n⁺n-перехода между контактом и стоком на зарядовое состояние области канала, когда расстояние между электродом затвора и контактом становится меньше 100 нм. Показано, что при формировании планарных беспереходных КНИ МОП-транзисторов по технологии 90 нм необходимо создавать сток / истоковые области размером 250 нм и задавать концентрацию в пленке в n-канальном транзисторе – $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и в p-канальном – $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что позволяет снизить подпороговые токи прибора до величины 10^{-13} А/мкм и иметь соотношение токов в открытом и закрытом состоянии 10^8 .

PLANAR SOI JUNCTIONLESS MOSFET

M. A. Korolev¹, Y. A. Chaplygin, A. S. Klyuchnikov², D. I. Efimova¹

¹NRU MIET, ²MERI SC

Junctionless MOSFETs have a number of advantages over traditional ones in terms of simplicity of design, manufacturing technology and reducing the impact of short-channel effects on the device characteristics. However, the known experimental nanowire MOSFETs have high subthreshold currents due to the parasitic bipolar transistor appearance in the closed state. In order to solve this problem, a structural model of a planar SOI in accordance with the technology standards of 90 nm, the route of mathematical modeling have been developed. Also with the use of the TCAD environment the influence of the impurity concentration in the SOI MOSFET silicon film on the threshold voltage, saturation currents and subthreshold currents have been analyzed. As a result of the research a new short-drain effect was discovered and explained. It manifests itself under the influence of the SCR of the n + n transition between the contact and the drain on the channel region charge state as the distance between the gate electrode and the contact becomes less than 100 nm. It is shown that in the formation of planar junctionless MOSFETs with 90 nm technology, it is necessary to create drain-source regions with a size of 250 nm and to specify the concentration in the film in an n-channel transistor – $6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and in a p-channel transistor – $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, which allows reducing subthreshold currents of the device up to $10^{-13} \text{ A/}\mu\text{m}$ and have a current ratio in the open and closed state 10^8 .

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время появилось много публикаций, посвященных новому полупроводниковому прибору – беспереходному МОП-транзистору (МОП БПТ) [1–9]. Конструкция такого транзистора была запатентована еще в 1925 году австро-венгерским физиком Юлиусом Лилиенфилдом, однако, в силу отсутствия в то время необходимых материалов, она не была реализована.

На рис. 1 представлено схематичное изображение такого беспереходного транзистора, сформированного на основе КНИ-структуры. Как следует из рисунка области канала, стока и истока находятся в пленке кремния, легированной одним типом примеси (в данном случае р-типа) [2, 3].

При достаточно большой величине контактной разности потенциалов между каналом р-типа и электродом затвора в пленке кремния происходит полное обеднение носителями заряда, что приводит к прекращению прохождения тока между истоком и стоком при приложении напряжения на стоке. Для возникновения проводящего объемного канала необходимо приложить к электроду затвора компенсирующий потенциал, больший, чем контактная разность потенциалов (если не учитывать зарядовое состояние МОП-структуры), ранее приводящая к полному обеднению полупроводниковой пленки (режим неполного обеднения). Рис. 2 иллюстрирует изменение состояния структуры МОП БПТ в зависимости от потенциала затвора.

Если провести аналогию, то функционирование беспереходного транзистора можно сравнить

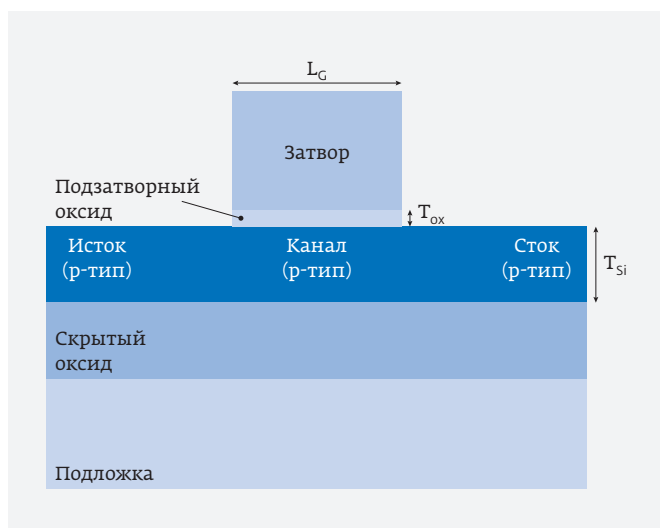


Рис. 1. Схематичное изображение беспереходного КНИ МОП-транзистора

с управлением шлангом, по которому течет вода: пережимаем локально шланг – не течет, разжимаем – течет. Причем скорость потока зависит от силы пережатия шланга [2], и, по существу, с электронной точки зрения БПТ представляет собой управляемый электрическим полем резистор.

У беспереходного транзистора есть преимущества перед обычным МОП-транзистором. В первую очередь, такое устройство значительно легче формировать с точки зрения технологии – нет необходимости в имплантации и активации имплантированной примеси при создании сток / истоковых областей и дополнительных структур типа LDD, Halo и Pocket, необходимых для подавления короткоканальных эффектов обусловленных ОПЗ рп-переходов, так как таких переходов в БПТ нет, а значит не нужен дополнительный высокотемпературный отжиг, увеличивается выбор материалов для формирования диэлектрического слоя и электрода затвора, сокращается технологический маршрут. Кроме того, такая конструкция позволяет улучшить характеристики транзистора, например, существенно уменьшить токи утечки, что снижает энергопотребление схем, и повысить быстродействие вследствие увеличения подвижности носителей в объемном канале, защищенном от поверхностных ловушек областями ОПЗ МОП-структур [3].

На рис. 2а представлено распределение плотности тока в канале инверсионного МОПТ и беспереходного транзистора. Как следует из рисунка, в отличие от обычного МОПТ, у БПТ канал расположен не на поверхности, а в объеме.

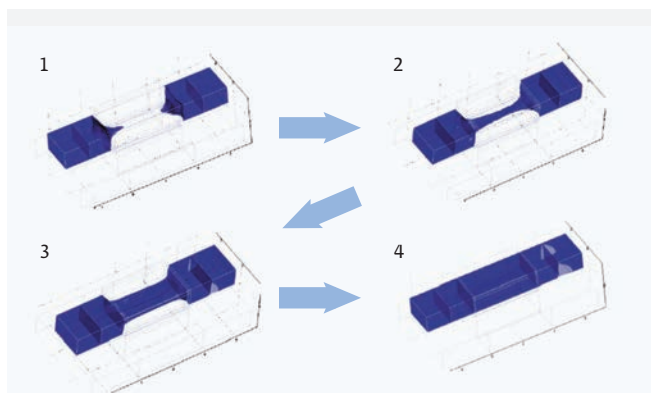


Рис. 2. Изменение состояния структуры МОП БПТ в зависимости от потенциала затвора: 1. $U_з = 0$. Полное обеднение. 2. $U_з = U_{пор}$. Неполное обеднение (образование объемного проводящего канала). 3. $U_з > U_{пор}$. Увеличение сечения канала. 4. $U_з \gg U_{пор}$. Полное обогащение [2]

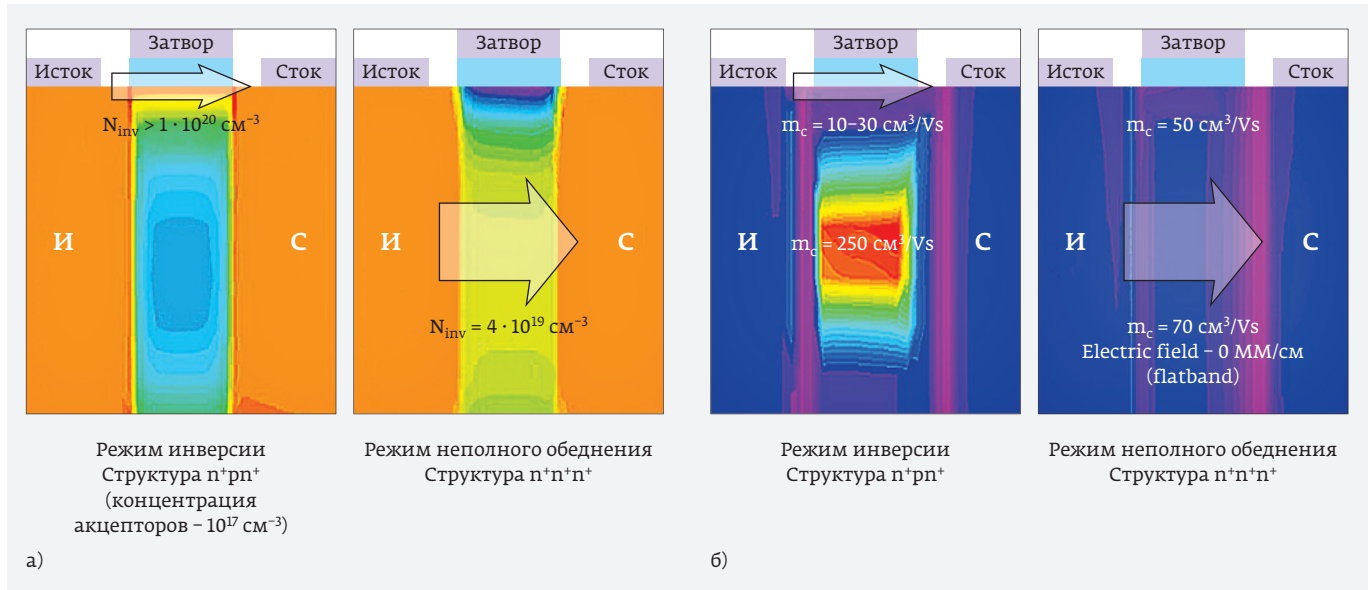


Рис. 3. Сравнение инверсионного МОПТ и БПТ [3]

Как было сказано ранее, у БПТ подвижность носителей в канале выше, чем у инверсионного МОПТ, так как его канал изолирован от поверхностных ловушек ОПЗ МОП-структур. Из рис. 3б видно, что в беспереходном транзисторе подвижность носителей в объемном канале больше практически в два раза, чем в инверсионном, даже при концентрации примеси в пленке кремния 10^{19} см^{-3} . Если же концентрацию примеси в рабочем теле прибора снизить до 10^{17} см^{-3} , то подвижность носителей заряда будет выше в 10 раз (рис. 3а, область объема).

Несмотря на все преимущества БПТ перед инверсионным МОПТ, такой транзистор имеет существенный недостаток. Основные публикации посвящены МОП БПТ нанопроволочной конструкции с размером канала всего $20 \times 10 \text{ нм}$. Это приводит к тому, что при низкой концентрации легирующей примеси количество основных носителей заряда в области канала очень мало и недостаточно для нормальной работы транзистора. Как было показано [4], для того чтобы прибор мог нормально функционировать, при таких размерах канала концентрация примеси в пленке кремния должна быть не менее чем 10^{19} см^{-3} .

Однако увеличение концентрации примеси в пленке приводит к резкому увеличению подпорогового тока, как видно из рис. 4б.

Этот эффект объясняется тем, что такая высокая концентрация легирующей примеси приводит к возникновению токов утечки в выключенном состоянии у БПТ из-за межзонного тунне-

лирования носителей заряда из валентной зоны канала в зону проводимости стока в области перехода канал – сток (рис. 4а) в результате увеличения напряженности электрического поля в области перехода сток – канал. При туннелировании «зона – зона» образуются электрон-дырочные пары, электроны переходят в область стока, а дырки накапливаются в канале, так как существует барьер для переноса дырок из канала в исток [5]. Смещение в прямом направлении перехода исток – канал в конечном счете включает паразитный NPN биполярный транзистор, что и приводит к большому подпороговому току стока (он же ток коллектора биполярного транзистора).

В последние пять лет разработчики МОП БПТ пытаются найти решение проблемы больших токов утечки в БПТ в выключенном состоянии. На сегодняшний день предложено четыре способа уменьшения подпороговых токов в беспереходном транзисторе, основанные на локальном уменьшении величины электрического поля в области перехода канал – сток.

Первый способ, предложенный в 2012 году, заключается в увеличении толщины подзатворного оксида на границе канала и областей стока – истока (рис. 5а) [6]. Благодаря такой конструкции электрическое поле уменьшается и перестает возникать эффект межзонного туннелирования и подпороговые токи снижаются.

Второй способ, разработанный на год позже (2013 г.), использует локальное изменение материала

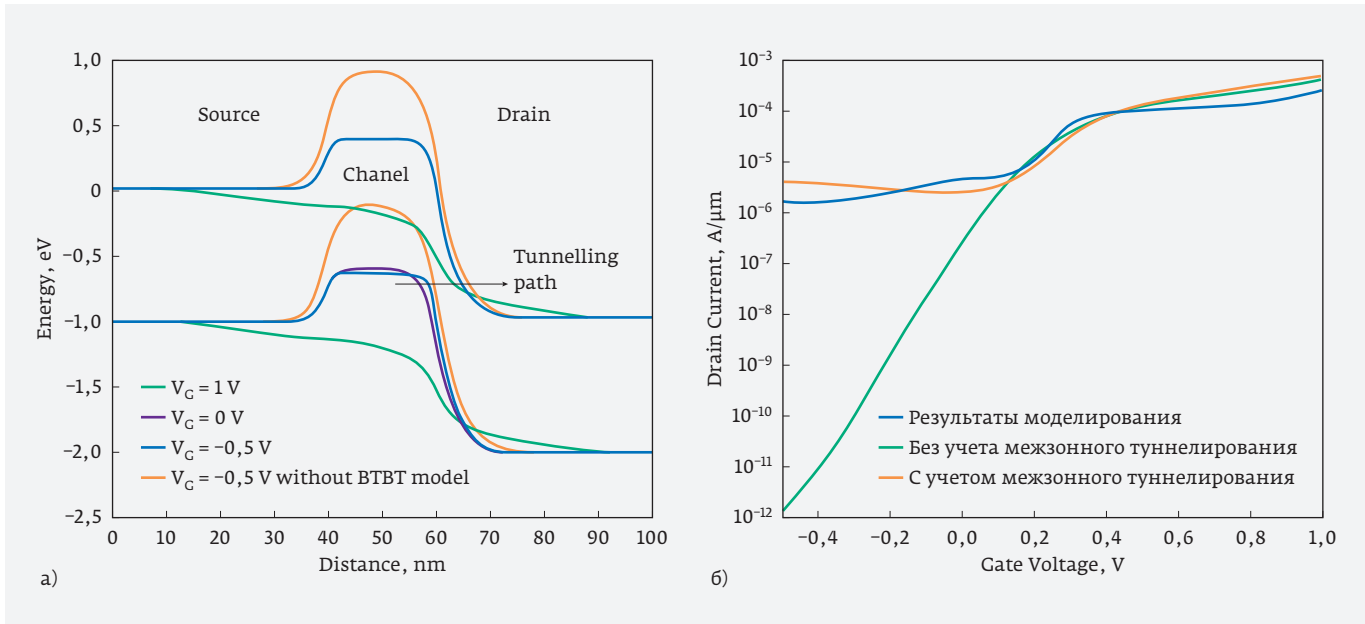
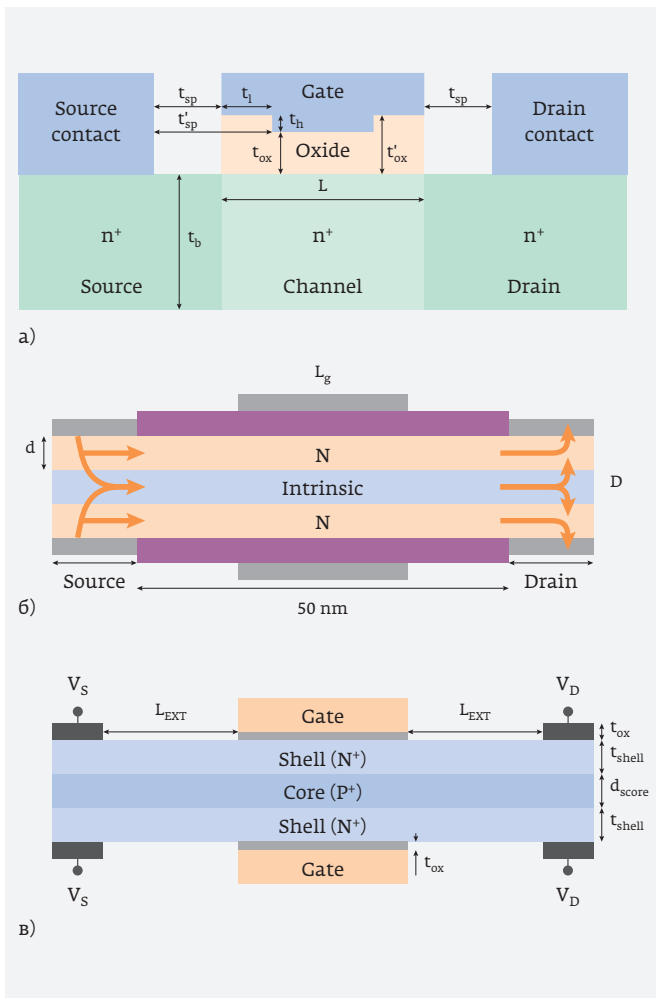


Рис. 4. Механизм межзонного туннелирования (а) и его влияние на проходную характеристику БПТ (б) [4]



электрода затвора в области перехода канал – сток, приводящее к уменьшению контактной разности потенциалов затвор – канал, что снижает величину электрического поля, а следовательно подавляет межзонное туннелирование [7].

Третий способ – использование оболочного профиля легирования (ОПЛ) – представлен на рис. 5б. Рабочая область транзистора представляет собой нанопроволоку круглого сечения. Центральная часть легируется малой дозой примеси, а поверхность (оболочка) – большой (отсюда и название) [8]. При таком способе в объеме нанопроволоки с низкой концентрацией примеси на переходе канал – сток величина электрического поля мала и отсутствует эффект межзонного туннелирования, а сильнолегированная оболочка обеспечивает необходимую проводимость.

Четвертый способ, предложенный в начале 2016 года, является развитием третьего – центральная часть имеет противоположный оболочке тип проводимости, что снижает электрическое поле в области канал – сток [9]. В результате межзонное туннелирование становится невозможным (рис. 5в).

Рис. 5. Конструктивные методы уменьшения подпорогового тока БПТ: увеличение толщины подзатворного оксида (а), оболочный профиль легирования (б), ОПЛ с оболочкой противоположного типа проводимости (в) [6, 8, 9]

Однако представленные методы сильно усложняют технологию формирования МОП БПТ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАНАРНОГО КНИ МОП БПТ

С целью решения указанной проблемы в данной работе была поставлена задача с помощью приборно-технологического моделирования в системе TCAD [10] разработать конструкцию планарного КНИ МОП БПТ, имеющего низкие подпороговые токи с учетом параметров технологического процесса изготовления традиционных КМОП ИС с проектными нормами 90 нм.

Была разработана структура для планарного КНИ МОП БПТ с учетом основных конструктивно-технологических параметров этого процесса. Схематичное изображение структуры КНИ МОП БПТ представлено на рис. 6а.

В транзисторе используется кремниевая подложка, легированная донорной примесью с постоянной концентрацией $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Скрытый изолирующий слой SiO_2 имеет толщину $T_{\text{box}} = 150 \text{ нм}$. Рабочий слой (тело) представляет собой пленку кремния n -типа длиной $0,89 \text{ мкм}$ и толщиной $T_{\text{Si}} = 70 \text{ нм}$. По краям пленки n -Si сформированы омические контакты n^+ -типа с концентрацией донорной примеси 10^{20} см^{-3} . Подзатворный диэлектрик SiO_2 имеет толщину $T_{\text{ox}} = 2,1 \text{ нм}$, а поликремниевый электрод затвора, легированный акцепторной примесью p^+ -типа, толщину $T_g = 150 \text{ нм}$.

Чтобы исследовать зависимость пороговых напряжений, подпороговых токов и токов насыщения транзистора от конструктивно-технологических параметров КНИ БПТ достаточно построить 2D-модель

в среде Synopsys Sentaurus TCAD и получить проходные и выходные характеристики устройства. Для моделирования структуры в программе задавались слои, их размеры и концентрация легирующей примеси, создавались контакты, после чего программа автоматически строила расчетную сетку для последующего расчета параметров прибора. Структурная модель планарного КНИ БПТ, созданная с помощью Sentaurus Structure Editor, изображена на рис. 6б. Для расчетов электрофизических параметров и вольт-амперных характеристик приборов в программе Sentaurus Device задавалась плотность поверхностных состояний (поверхностный заряд на границе кремния и оксида кремния), равная $N_{\text{ss}} = 10^{11} \text{ см}^{-2}$. При помощи итерационного метода проводилось изменение функции при подборе аргумента. Когда все контакты устройства смещены к одному и тому же напряжению, устройство находится в равновесии, а плотность электронов и дырок описывается постоянным квази-ферми-потенциалом.

Помимо порогового напряжения с помощью данной программы были определены подпороговые токи и токи насыщения транзистора.

Прежде чем приступить к основному исследованию, была проведена проверка адекватности разработанной математической модели реальному образцу прибора. Для этого был смоделирован КНИ МОП БПТ по технологии 20 нм, определены его параметры и проведено их сравнение с опубликованными характеристиками приборов [5] (рис. 4а сплошная линия). Из представленного рисунка видно, что результаты моделирования и опубликованные данные совпадают, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

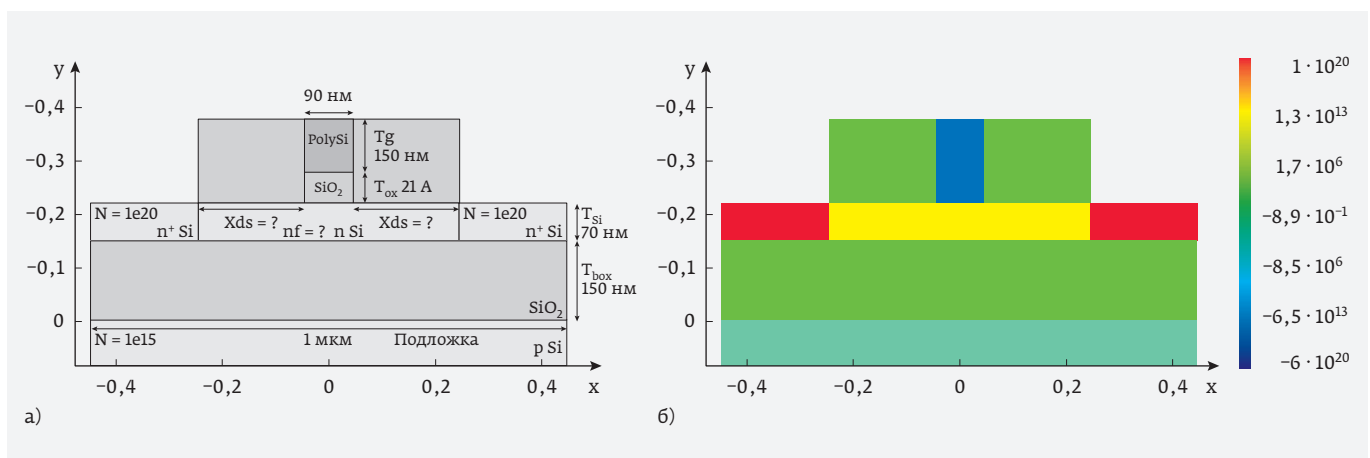


Рис. 6. Схематичное изображение планарного КНИ МОП БПТ с конструктивно-технологическими параметрами по технологии 90 нм (а) и его структурная модель (б)

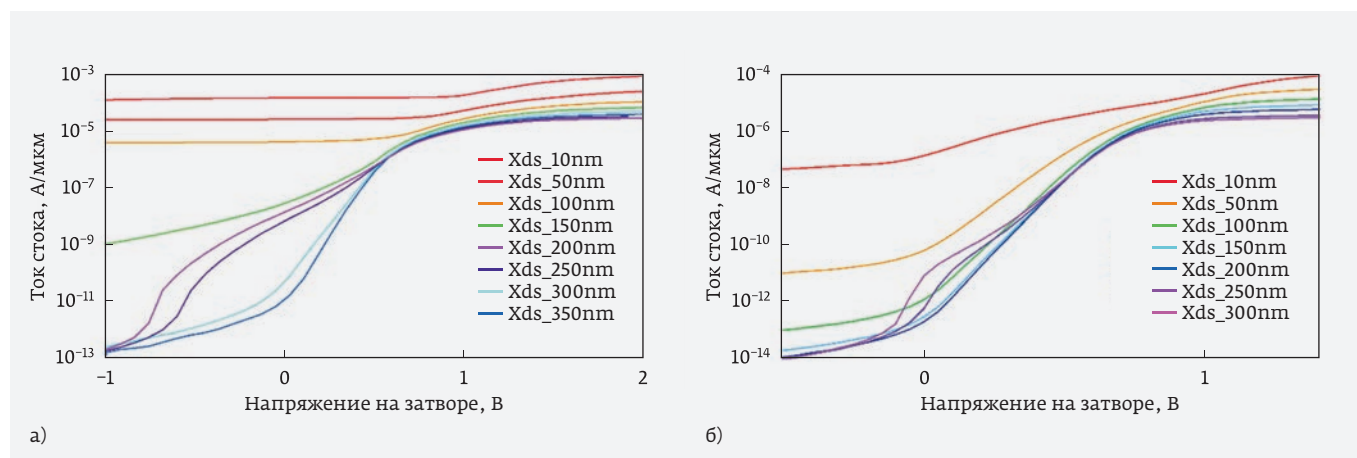


Рис. 7. Прходная ВАХ БПТ с разными толщинами спейсеров $V_d=0,1$ В (а), $V_d=1,2$ В (б)

Для разработки планарного КНИ МОП БПТ необходимо определить оптимальные размеры сток/истоковых областей и концентрацию примеси в пленке кремния.

Для решения первой проблемы исследуем влияние толщины спейсеров, определяющих в самосовмещенном процессе формирования МОП БПТ размеры областей истока и стока (расстояние от электрода затвора до края сильнолегированных контактов к стоку и истоку) на характеристики транзистора. Чтобы провести данное исследование необходимо задать какое-то определенное значение концентрации примеси в пленке кремния. Как известно, в технологии 90 нм инверсионного МОП-транзистора концентрация примеси в пленке составляет 10^{18} см⁻³. Однако, как уже было ранее указано, в беспереходном транзисторе при высокой концентрации возникает эффект межзонного тунелирования, поэтому для дальнейшего анализа была выбрана более низкая концентрация примеси в пленке кремния – $5 \cdot 10^{16}$ см⁻³.

С учетом всех заданных параметров моделируется несколько структурных моделей и рассчитываются характеристики транзистора при разных толщинах спейсера. Для определения порогового напряжения в качестве начального условия на сток подавалось напряжение 0,1 В, напряжение на затворе менялось от -1 до 2 В. Соответствующие рассчитанные проходные характеристики транзистора представлены на рис. 7а.

Анализ проходной ВАХ на рис. 7а позволяет построить зависимость порогового напряжения от толщины спейсеров (рис. 8, зеленая кривая).

Из представленного рисунка следует, что данная зависимость имеет максимум при толщине спей-

серов в районе 100 нм, причем пороговое напряжение резко снижается при дальнейшем уменьшении расстояния между областями контактов сток/исток и электродом затвора. Такой характер графика зависимости можно объяснить тем, что при близком расположении контактов сток/истока относительно электрода затвора ОПЗ p⁺n-перехода контактов влияет на зарядовое состояние канала, что, в свою очередь, приводит к снижению порогового напряжения. По аналогии с известным для МОПТ термином «короткоканальный» этот эффект можно назвать короткостокковым. После отдаления контактов сток/истока более чем на 100 нм от края электрода затвора ОПЗ контактов перестает существенно влиять на зарядовое состояние канала, а при дальнейшем увеличении размера сток/истоковых областей пороговое напряжение несколько снижается из-за увеличения сопротивления истока и стока. Таким образом, чтобы выбрать оптимальную толщину спейсера необходимо рассмотреть влияние расстояния между контактами сток/истока и электродом затвора на остальные основные характеристики транзистора.

Для этого рассмотрим работу БПТ с напряжением на стоке 1,2 В (рабочий режим для БПТ в случае технологии 90 нм). Полученная проходная ВАХ представлена на рис. 7б.

Из проходной характеристики следует, что при малых толщинах спейсеров подпороговые токи большие, что обусловлено снижением порогового напряжения вследствие влияния короткостоккового эффекта, как было сказано ранее. Расчетная зависимость подпорогового тока от толщины спейсеров, представлена на рис. 8 (синяя кривая). Из графика видно, что при размере сток/истоковых областей

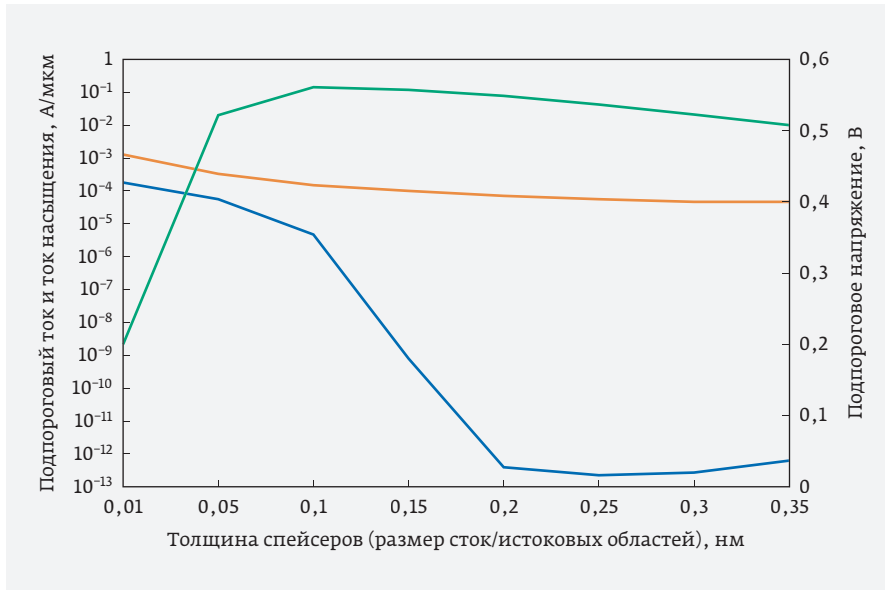


Рис. 8. Зависимость порогового напряжения (зеленая кривая), подпороговых токов (синяя кривая) и тока насыщения (оранжевая кривая) от толщины спейсеров

от 200 до 300 нм подпороговые токи минимальны. Следовательно, для наилучших характеристик транзистора необходимо выбрать толщину спейсера именно в этом диапазоне.

Важным параметром МОП БПТ является ток насыщения. На эту характеристику прибора существенное влияние оказывает сопротивление областей сток/исток. Рассмотрим зависимость тока насыщения от толщины спейсеров (рис. 8, оранжевая кривая). Из рисунка следует, что максимальное значение тока насыщения имеет при толщине спейсеров до 100 нм, но как было показано ранее, именно на этом участке толщин на канал МОП БПТ действует ОПЗ p⁺n-перехода контакта к стоку и он не может быть использован при формировании прибора. При дальнейшем увеличении толщины спейсеров наблюдается уменьшение тока насыщения, что обусловлено соответствующим увеличением сопротивления областей стока и истока.

Не менее важным параметром полупроводникового прибора является и отношение между токами во включенном и выключенном состоянии. Высокое значение этого отношения особо значимо при работе транзистора в микромощном режиме в СБИС высокой степени интеграции. Рассчитанная зависимость отношения токов от толщины спейсеров приведена на рис. 9.

Из графика следует, что при толщине спейсеров от 160 до 340 нм наблюдается максимальное отношение

токов во вкл/выкл состояниях БПТ. При меньших толщинах спейсеров величина отношения токов падает из-за возрастания подпорогового тока вследствие влияния короткопорогового эффекта, приводящего к уменьшению порогового напряжения, при больших – уменьшается вследствие снижения величины тока насыщения из-за возрастания последовательного сопротивления прибора. Для дальнейшего анализа была выбрана толщина спейсеров – 250 нм.

С учетом всех заданных параметров моделируется несколько структурных моделей и рассчитываются характеристики транзистора при разных концентрациях примеси в пленке кремния. Для определения влияния концентрации примеси в пленке

кремния на подпороговые токи и токи насыщения моделируется работа беспереходного транзистора с напряжением на стоке 1,2 В. Полученная проходная ВАХ представлена на рис. 10.

Из графиков следует, что лишь при снижении концентрации примеси в пленке менее чем 10^{17} см⁻³ наблюдаются низкие подпороговые токи, что свидетельствует об отсутствии эффекта межзонного

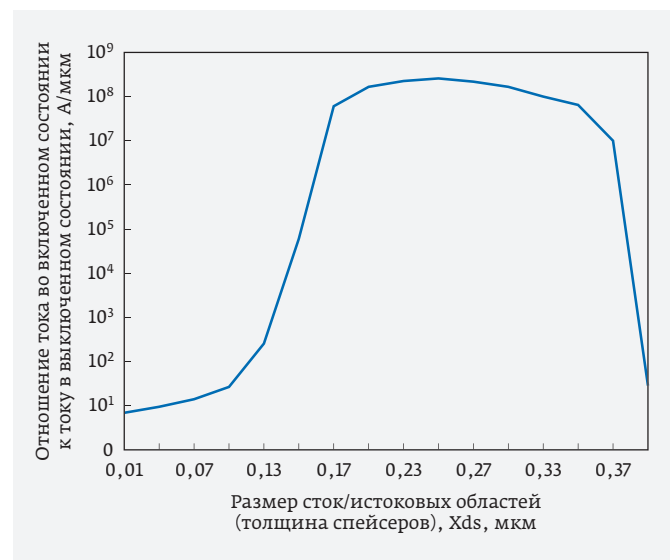


Рис. 9. Зависимость отношения токов во вкл/выкл состоянии транзистора от толщины спейсеров

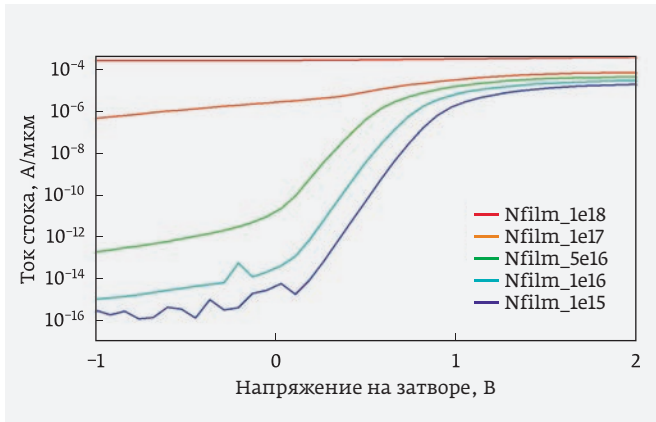


Рис. 10. Проходные ВАХ КНИ МОП БПТ с разными концентрациями примеси в пленке. $V_d = 1,2$ В

туннелирования, и эта концентрация определяет допустимый максимум легирования пленки. Для дальнейшего исследования из данной переходной характеристики получаем зависимость подпорогового тока от концентрации примеси в пленке (рис. 11, синяя кривая).

Из графика следует, что при уменьшении концентрации примеси подпороговые токи снижаются, причем при концентрации в пленке ниже $7 \cdot 10^{16}$ подпороговые токи в БПТ становятся существенно ниже, чем даже у обычного инверсионного МОП-транзистора. Однако, при изменении концентрации примеси в пленке меняются соответственно и токи насыщения прибора. В частности, при умень-

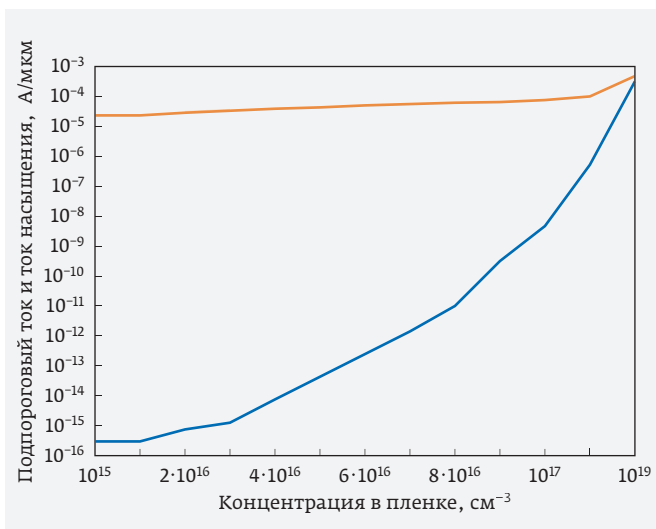


Рис. 11. Зависимость подпорогового тока (синяя кривая) и тока насыщения (оранжевая кривая) от концентрации примеси в пленке

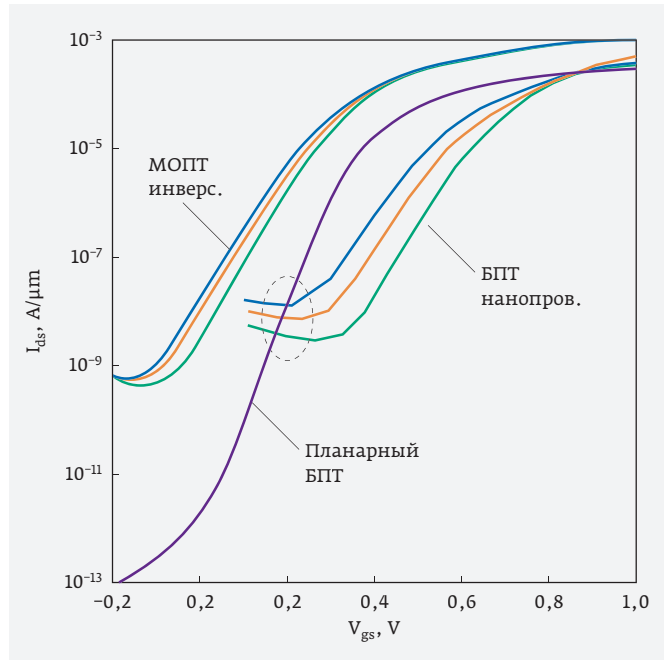


Рис. 12. Переходные ВАХ разработанного планарного КНИ МОП БПТ, нанопроволочного МОП БПТ и инверсионного МОП-транзистора [3]

шению концентрации примеси в пленке кремния они могут сильно снизиться, что ухудшит быстродействие транзистора. Влияние концентрации примеси в пленке на ток насыщения представлено на рис. 11 (оранжевая кривая).

Из рисунка следует, что ток насыщения имеет максимальное значение при концентрации примеси в пленке выше 10^{18} см^{-3} , но, как было ранее показано, именно в этом диапазоне концентраций примеси и возникает эффект межзонного тунне-

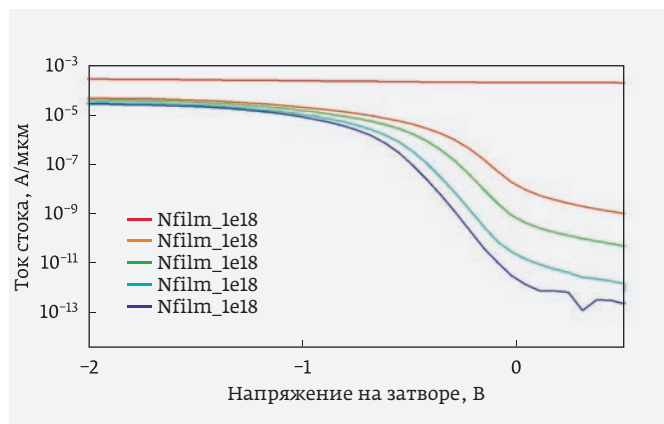


Рис. 13. Проходная ВАХ с разными концентрациями примеси в пленке р-канального транзистора

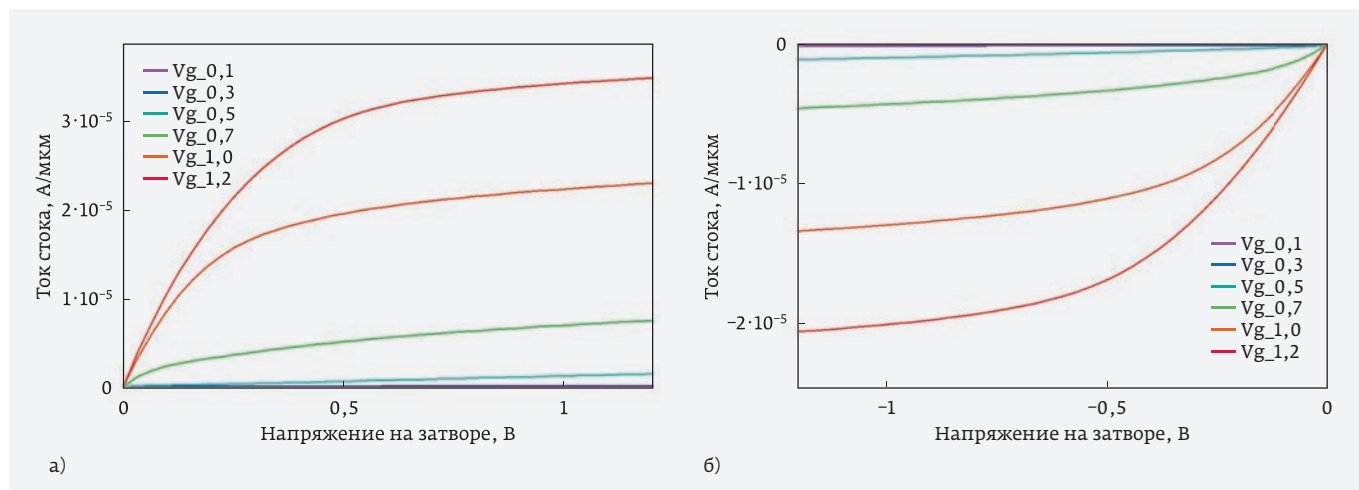


Рис. 14. Выходные ВАХ беспереходного транзистора n-типа (а) и р-типа (б)

лирования и резко возрастают подпороговые токи. При снижении концентрации примеси ниже этого уровня ток насыщения пропорционально уменьшается вследствие возрастания последовательного сопротивления прибора.

Таким образом, результаты исследования позволяют сделать вывод, что при оптимальном расположении контактов к истоку и стоку относительно электрода затвора и при концентрации примеси в пленке $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ величина подпорогового тока имеет значение $2,5 \cdot 10^{-13} \text{ А/мкм}$, что значительно ниже подпорогового тока в инверсионном МОП-транзисторе и нанопроволочном МОП БПТ при сопоставимом с этими приборами током насыщения (рис. 12).

Аналогично p-канальному транзистору было проведено моделирование r-канального КНИ МОП БПТ. Была получена проходная ВАХ с разными концентрациями примеси в пленке при напряжении на стоке 1,2 В (рис. 13).

Для возможности создания КМОП-структуры надо выбрать точное значение концентрации в пленке, причем таким образом, чтобы пороговое напряжение входило в диапазон от $-0,5$ до $-0,4$ В. Расчеты показали, что уровень концентрации примеси в пленке кремния r-типа должен быть равен $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

После подбора всех параметров транзисторов с p- и n-каналом были получены их выходные характеристики (рис. 14).

Из рисунка следует, что выходные ВАХ беспереходных транзисторов с p- и r-каналами симметричны по модулю. Таким образом, становится возможным создание на их основе КМОП-структуры.

ВЫВОДЫ

- Разработаны структурная модель планарного КНИ МОП БПТ по нормам технологии 90 нм, маршрут математического моделирования, и с использованием приборно-технологического моделирования в среде TCAD исследовано влияние расположения контактов сток/истоковых областей относительно электрода затвора и концентрации примеси в пленке кремния КНИ МОП БПТ на пороговое напряжение, токи насыщения и подпороговые токи.
- В результате исследования обнаружен и объяснен новый короткостокковый эффект, обусловленный влиянием ОПЗ p⁺n-перехода контакта к стоку на зарядовое состояние области канала при снижении расстояния между электродом затвора и контактом меньше 100 нм.
- Показано, что при формировании планарных беспереходных КНИ МОП транзисторов с каналом p- и r-типа по технологии 90 нм необходимо создавать сток/истоковые области размером 250 нм и задавать концентрацию примеси в пленке в p-канальном транзисторе $-6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и в r-канальном $-5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что позволяет снизить подпороговые токи прибора до величины 10^{-13} А/мкм при сопоставимой с традиционными МОПТ величине тока насыщения и иметь соотношение токов в открытом и закрытом состоянии -10^8 .

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Liu T., Chang L.** Transistor Scaling to the Limit, in *Into the Nano Era: Moore's Law Beyond Planar Silicon CMOS* / Ed. H. R. Huff. – Springer, 2009. P. 191–223.
2. **Rios R.** Junctionless similitude and conventional trigate transistors with down to L_g -26 nm // *IEEE J. Electron Devices Soc.* 2011. Vol. 32. № 9. September. P. 1170–1172.
3. **Lee C., Afzalian A., Colinge J., Yan R., Ferain I. and Akhavan N.** Multigate junctionless field-effect transistor // *Appl. Phys. Lett.* 2009. Vol. 94. № 5. P. 053511–053512.
4. **Raskin J., Colinge J., Ferain I., Kranti A., Lee C., Akhavan N., Razavi P.** Improvement mobility in junctionless nanowire transistors by strain uniaxial // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97. № 4. P. 042114–042116.
5. **Park C. et al.** Electrical characteristics of 20-nm junctionless Si nanowire transistors // *Solid-State Electron.* 2012. Vol. 73. P. 7–10.
6. **Su C., Tsai T., Liou Y., Chao T., Lin Z. and Lin H., Moon D.** Around gate transistors junctionless heavily doped with nanowire channels polysilicon // *IEEE Electron Device Lett.* 2011. Vol. 32. № 4. P. 521–523.
7. **Migita S., Morita Y., Matsukawa T., Masahara M. and Ota H.** Experimental demonstration of ultrashort-channel (3 nm) junctionless FETs utilizing atomically sharp V-grooves on SOI // *IEEE Trans. Nanotechnol.* 2014. Vol. 13. № 2. P. 208–215.
8. **Wong I., Chen Y., Huang S., Tu W., Bajal M. and Liu C.** Junctionless gate-all-around pFETs using in-situ boron-doped Ge channel on Si // *IEEE Trans. Nanotechnol.* 2015. Vol. 14. № 5. P. 878–882.
9. **Jagadesh M. Kumar and Sahay S.** Controlling BTBT induced parasitic BJT action in junctionless FETs using a hybrid channel // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2016. Vol. 63. № 8. P. 3350–3353.
10. **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.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КОМБИНАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

► Д. В. Тельпухов, А. И. Деменева, Т. Д. Жукова, Н. С. Хрущев
ИППМ РАН

В настоящее время актуальность исследований в области повышения надежности функционирования микросистем неуклонно возрастает. Во многом это связано с непрекращающейся миниатюризацией, приводящей к снижению порога воздействия, достаточного для возникновения сбоев и отказов. Статья посвящена актуальной проблеме построения схем функционального контроля, обнаруживающих ошибки. Исследуются различные помехоустойчивые коды (код повторения, Бергера, Хемминга и Голея) с точки зрения применимости их к задаче построения контролепригодных логических устройств. В статье рассматриваются различные аспекты аппаратной реализации схем функционального контроля, а также вопросы разработки средств автоматизации проектирования. На большом наборе контрольных комбинационных схем исследована эффективность помехоустойчивых кодов с точки зрения структурных затрат и обнаруживающей способности.

THE RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AUTOMATION SYSTEMS FOR THE CONCURRENT ERROR DETECTION COMBINATIONAL CIRCUITS

D.V. Telpukhov, A. I. Demeneva, T. D. Zhukova, N. S. Khrushchev
IPPM RAS

Today, the urgent task is to increase the reliability of microelectronic systems. In many ways it is connected with permanent miniaturization that leads to decreasing of a threshold of impact which is sufficient for the occurrence of failures. The article is devoted to the actual problem of constructing concurrent error detection schemes. Different error detection codes are investigated (repetition code, Berger, Hamming and Golay) from the point of view of their applicability to the problem of creating CED schemes. Various aspects of a hardware implementation of CED schemes and development of design automation tools are considered in the article. The effectiveness of error detection codes has been investigated on a large set of benchmark schemes in terms of structural costs and vulnerability.

ВВЕДЕНИЕ

В контексте многообразных задач, связанных с обеспечением надежности функционирования, в настоящее время особенно выделяют вопросы, связанные с обеспечением устойчивости схем к случайным сбоям – временным нарушениям корректной работы внутренних узлов ИС без какого-либо повреждения микросхемы. Причины сбоев могут быть разными, и природа их возникновения по существу не влияет на методы борьбы с их последствиями. Следует, однако, упомянуть, что большая часть сбоев в современном оборудовании, работающем в условиях воздействия внешней радиации, связана с влиянием однократных радиационных эффектов вследствие воздействия тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ).

Борьба со случайными сбоями на логическом уровне связана с усилением механизмов маскирования сбоев, которые изначально присущи логическим схемам. Выделяют три способа маскирования случайных сбоев: логическое, электрическое и временное маскирование [1, 2]. Основное внимание в данной работе будет уделяться логическому маскированию, которое заключается в том, что зачастую сбой возникает в участках схемы, не оказывающих влияние на выход схемы в условиях заданных входных воздействий. Этот механизм не зависит от технологического базиса и имеет наибольший вклад в общую интенсивность сбоев схемы [3]. Кроме того, логическое маскирование является наиболее трудоемким свойством для моделирования [4].

Отдельным независимым подходом к борьбе с последствиями случайных сбоев можно считать средства контроля, которые как правило, делят на две группы [5]:

- тестовый контроль – проводится периодически в определенные для этого временные промежутки;
- функциональный контроль – проводится непрерывно в рабочем режиме, без отключения от объектов управления.

Функциональный контроль в контексте комбинационных схем обеспечивается наличием дополнительных схем, сигнализирующих о появлении ошибок, и в некоторых случаях – производящих исправление. Вопросы эффективности применения схем функционального контроля сво-

дятся к соотношению структурных затрат на эти дополнительные схемы к вероятности обнаружения и/или исправления ошибок. Следует отметить, что дополнительная логика, вносимая в схему, также является объектом возникновения сбоев, что накладывает определенные ограничения на используемые схемы функционального контроля. Так, например, схемы, исправляющие ошибки (имеющие большую структурную избыточность), реже используются на практике именно из-за высокого риска возникновения сбоя в участках схемы, отвечающих за исправление ошибок.

БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Структура схемы функционального контроля состоит из четырех блоков: контролируемая комбинационная схема, копия комбинационной схемы, кодер и декодер. На рис. 1 изображена базовая структура схем функционального контроля, обнаруживающих ошибки. Значения на выходах комбинационной схемы ассоциируются с информационными разрядами, в то время как кодер вычисляет контрольные разряды. Информационные и контрольные разряды составляют кодовое слово, которое подается на декодер. Декодер формирует флаг, который сигнализирует об ошибке в кодовом слове.

При возникновении сбоя выход системы контроля характеризуется одним из четырех возможных состояний [2]:

- сбой маскирован – это означает, что при возникновении сбоя не повлиял ни на реализуемые комбинационной схемой значения, ни на флаг ошибки, это событие может произойти благодаря механизму логического маскирования;

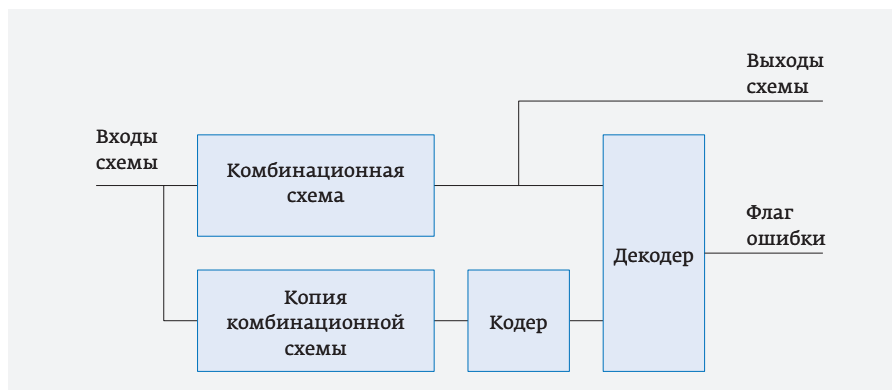


Рис. 1. Схема функционального контроля

- ошибка обнаружена – искажения повлияли на реализуемые схемой значения, схема функционального контроля сигнализировала об этом;
- ошибка пропущена – выходные данные имеют ошибку, но схема функционального контроля не сообщила об этом;
- ложная тревога – выходные сигналы с контролируемого логического устройства не исказились, но схема выдает флаг ошибки. Это событие возникает при попадании сбоя не в контролируемое логическое устройство, а в кодер, декодер или копию контролируемой схемы.

Проектирование схем функционального контроля сопряжено с решением множества вопросов, которые не возникают при проектировании других комбинационных схем. Во-первых, необходимо определиться с уместностью использования такого рода защиты для данной комбинационной схемы. Зачастую, применение какой бы то ни было схемы функционального контроля может лишь ухудшить текущий уровень сбоеустойчивости. Такая ситуация может возникнуть в случае небольших комбинационных схем с большим числом выходов – накладные расходы на схему защиты могут превысить размер исходной схемы.

Во-вторых, следует применить наиболее эффективный метод построения кодера и декодера для данной комбинационной схемы. Эта задача, по сути, сводится к выбору наиболее подходящего помехоустойчивого кода в качестве основы для построения кодера и декодера. В последующих главах будут рассмотрены помехоустойчивые коды (код повторения, Бергера, Хемминга и Голея); эффективность их применения будет исследована на большом наборе контрольных комбинационных схем; будут даны рекомендации по их использованию для различных комбинационных схем, в зависимости от их параметров и модели ошибок.

В-третьих, при проектировании схем функционального контроля, равно как и других схем, включающих в себя определенную структурную избыточность, необходимо производить минимизацию лишь отдельных составных блоков, отказавшись от оптимизации по площади на верхнем уровне. Дело в том, что промышленные САПР логического синтеза не имеют средств проектирования схем функционального контроля, и любую избыточность, имеющуюся в схеме, без других на то указаний, считают излишней. Синтез традиционных схем функционального контроля в таких САПР приво-

дит к исключению блоков кодера, декодера и копии исходной схемы. Флаг ошибки замыкается на ноль – система не учитывает возможность появления ошибок. Чтобы обойти эту сложность, следует устанавливать особые директивы, говорящие компилятору, какие блоки нельзя исключать из проекта. Следует отметить, что минимизация копии комбинационной схемы и кодера возможна, благодаря чему открываются возможности для использования помехоустойчивых кодов, отличных от кода повторения. Выигрыш в суммарной площади основной и корректирующей схем при использовании таких кодов получается за счет того, что число проверочных разрядов меньше (и обычно – значительно) числа информационных, и методы минимизации позволяют синтезировать корректирующую схему существенно меньшей площади, чем основная схема.

ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЕ КОДЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ В СХЕМАХ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Сбои, возникающие на вентилях комбинационной схемы, непредсказуемо влияют на выходные значения, из чего следует, что поведение данной системы невозможно описать в рамках традиционной модели двоичного симметричного канала, обычно используемой при разработке избыточных кодов. Из этого следует тот факт, что обычные оценки качества кода, такие как кодовое расстояние, избыточность и т. д., оказываются не релевантными. Для оценки применимости того или иного помехоустойчивого кода необходимо реализовать всю схему функционального контроля и провести моделирование.

Далее приведем описание помехоустойчивых кодов, исследуемых в контексте построения систем функционального контроля.

Код повторения – это простейший из помехоустойчивых кодов, который при реализации в аппаратуре сводится к классической схеме дублирования: значения на выходе кодера равны значениям на входе. Декодер представлен схемой сравнения.

Код Бергера – нелинейный код, который определяет любые однонаправленные ошибки [5, 6]. Однонаправленные ошибки – это искажения вида $0 \rightarrow 1$, или $1 \rightarrow 0$. Изначально код предназначался для асимметричного канала, где изменяются либо только единичные разряды, либо нулевые, причем вероятность искажения из $0 \rightarrow 1$ меньше, чем вероятность искажения $1 \rightarrow 0$.

Кодирование происходит по следующему алгоритму:

1. Определяется число контрольных разрядов [6]:

$$k = \lceil \log_2(m+1) \rceil, \quad (1)$$

где k – число контрольных разрядов; m – число информационных разрядов; обозначает целое сверху от α .

2. Определяются значения контрольных разрядов, которые образуются путем сложения единиц или нулей в информационных разрядах.
3. Контрольный вектор занимает k разрядов в кодовом слове и располагается после m разрядов информационного слова.

Так как код Бергера является помехоустойчивым и разделимым, он подходит для реализации в схеме функционального контроля.

Кодек, построенный на основе кода Бергера, состоит из набора сумматоров. Декодер содержит кодирующее устройство, идентичное кодеру, и схему сравнения.

Код Хемминга – это избыточный разделимый код, способный исправить одну ошибку и обнаружить две.

Формирование кодового слова при помощи кода Хемминга реализуется следующим образом [7]:

1. Определяется число контрольных разрядов из соотношения:

$$2^k - k \geq m + 1, \quad (2)$$

где k – число контрольных разрядов; m – число информационных разрядов.

2. Определяются положения проверочных символов в кодовом слове: контрольные разряды в кодовом слове стоят на позициях равных степени числа два.
3. Для получения i -го контрольного разряда необходимо сложить по модулю 2 те информационные разряды, в двоичном виде у которых на i -ом месте справа стоит единица.

Схема контроля, построенная на основе кода Хемминга, имеет такую же структуру, как схема контроля, построенная на основе кода Бергера, единственным отличием является состав и принцип работы кодера.

Кодек состоит из элементов «исключающее ИЛИ». При помощи этих элементов происходит сложение по модулю двух информационных символов, от которых зависит контрольный бит.

Если контрольный разряд зависит только от одного информационного разряда, то значение на выходе равно значению на входе.

Код Голея – совершенный двоичный код, исправляющий три ошибки. Он является циклическим кодом, количество контрольных бит которого равно двадцати трем, из них двенадцать бит – информационных.

Код Голея имеет два взаимных порождающих полинома [8]:

$$g(x) = x^{11} + x^{10} + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + 1, \quad (3)$$

$$\tilde{g}(x) = x^{11} + x^9 + x^7 + x^6 + x^5 + x + 1. \quad (4)$$

В качестве порождающего многочлена кода Голея можно использовать как $g(x)$, так и $\tilde{g}(x)$.

Формирование кодового слова при помощи кода Голея реализуется аналогично алгоритму кодирования систематического циклического кода [9]:

1. Образующий полином $u(x)$ степени $m-1$ умножается на x^k , где $k = n - m$, k – число контрольных разрядов; m – число информационных разрядов; n – длина кодового слова.
2. Находится остаток $b(x)$ от деления $x^k \cdot u(x)$ на порождающий полином $g(x)$.
3. Полином $b(x)$ заносится в k левых разрядов кодового слова, m правых разрядов занимает информационное слово.

Кодек в схеме контроля на основе кода Голея состоит из элементов «исключающее ИЛИ».

Проверочный блок состоит из декодера и рядов из элементов «ИЛИ». Структура декодера схожа со структурой кодера. На выходе кодера получается одиннадцать значений. Если хотя бы один из выходов имел значение, равное единице, то в схеме контроля произошла ошибка, иначе – ноль. Декодер сравнивает значения контрольных разрядов, полученных при обработке копии комбинационной схемы, со значениями контрольных разрядов, полученных при обработке тестируемой схемы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Как уже было сказано ранее, эффективность той или иной схемы функционального контроля для комбинационной схемы определяется по таким параметрам, как структурная избыточность [10] и обнаруживающая способность. В практической части исследования будут рассмотрены все помехоустойчивые коды, описанные в прошлой главе. В качестве базовых моделей ошибок будут рассмотрены:

- модель кратных ошибок – в рамках этой модели фиксируется параметр кратности ошибок n , и на каждой итерации в n случайных вентилях вносятся сбой;

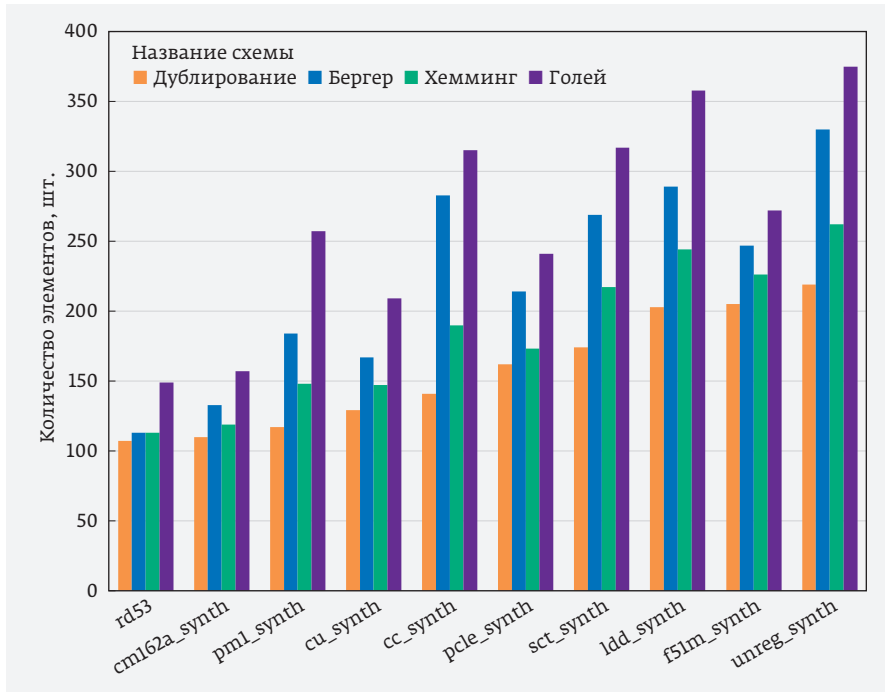


Рис. 2. Оценка структурной избыточности для разных помехоустойчивых кодов

- вероятностная модель возникновения ошибок Фон-Неймана – в рамках этой модели считается, что все логические элементы имеют одинаковую независимую вероятность сбоя, в то время как количество ошибок в схеме не ограничено [1].

В качестве сбоя в рамках данного исследования использовалась инверсия сигнала вентиля (инверсная неисправность). В качестве набора контрольных комбинационных схем применялись ISCAS’85 и LGSynth’89.

В первом эксперименте производилась оценка структурных затрат. На рис. 2 представлены некоторые из результатов сравнения помехоустойчивых кодов по критерию структурная избыточность. Наименьшие структурные затраты у схем дублирования, затем (в порядке возрастания количества используемых элементов) идут схемы контроля на основе кодов Хемминга, Бергера и Голея.

Во втором эксперименте оценивались структурные затраты схем функционального контроля в зависимости от количества выходов схемы. Для того чтобы выделить структурную избыточность из общей площади получаемых схем, оценивалась разница в занимаемой площади между разными схемами функционального контроля. За эталон была принята схема дублирования. Был обнаружен рост

разницы в количестве используемых элементов между схемами контроля на основе кодов Бергера, Хемминга, Голея и дублированием. Данная зависимость показана на рис. 3. Следует отметить, что для схем со сравнительно небольшим числом выходов структурные затраты на различные схемы функционального контроля очень близки, и при выборе наилучшей следует учитывать лишь ее обнаруживающие свойства, в то время как при большом числе выходов схемы следует учитывать и структурную избыточность методов.

Главной целью оставшихся экспериментов являлось исследование обнаруживающей способности для схем контроля на основе помехоустойчивых кодов. Было проведено по двадцать тысяч моделирований для каждой схемы при различных комбинациях входных сигналов. Вероятности получены методом усреднения по всем комбинационным схемам из наборов ISCAS85 и LGSynth89.

Третий эксперимент связан с внедрением ошибки фиксированной кратности. Инжектировались как однократные, так и многократные ошибки. В табл. 1

Третий эксперимент связан с внедрением ошибки фиксированной кратности. Инжектировались как однократные, так и многократные ошибки. В табл. 1

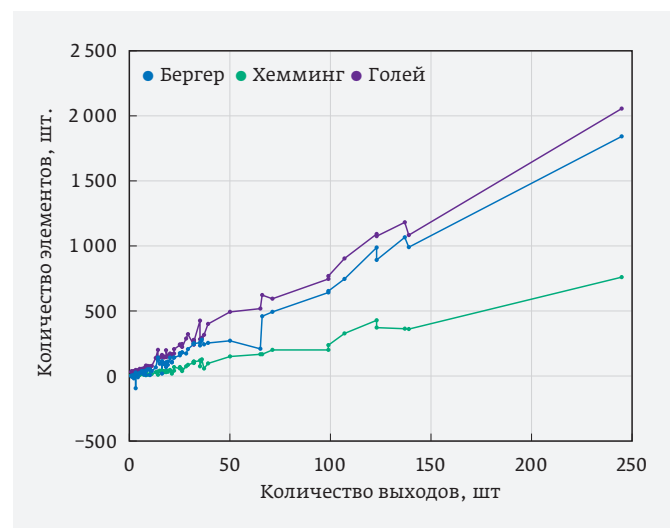


Рис. 3. Разница в количестве элементов между схемами на основе помехоустойчивых кодов и схемой дублирования

Таблица 1. Вероятность ошибок каждого типа при внедрении однократной ошибки

Схема контроля	Вероятность маскирования ошибки, %	Вероятность пропуска ошибки, %	Вероятность ложной тревоги, %	Вероятность обнаружения ошибки, %
Схема дублирования	69,1	0,0	17,2	13,7
Код Бергера	67,3	0,9	21,1	10,7
Код Хемминга	67,7	0,1	20,0	12,2
Код Голея	65,0	0,0	25,9	9,1

приведены вероятности наступления соответствующих событий для разных схем функционального контроля для случая однократной ошибки. Из таблицы видно, что наибольшую долю всех ошибок составляют маскированные ошибки. Наилучшей схемой для случая однократных ошибок является схема дублирования.

Главным параметром для схем функционального контроля является вероятность пропуска ошибки. Вероятность пропуска ошибки в схеме контроля должна быть как можно меньше. На рис. 4 представлена зависимость доли пропущенных ошибок в схеме контроля от кратности инжектированных

ошибок. Из графиков следует, что схемы на основе дублирования и кода Голея не пропускают ни одной однократной ошибки. При внедрении ошибок кратностей от двух до пяти наименьшее количество пропущенных ошибок наблюдается у схемы контроля на основе кода Голея.

Из теории известно, что ошибки в контрольных разрядах кодом Бергера всегда обнаруживаются декодером. Это связано с тем, что нарушается соответствие между количеством единичных бит в информационном разряде и значением проверочного разряда [5]. Искажения в информационных символах могут не обнаруживаться, так как при одинаковой сумме единиц в информационных разрядах все контрольные разряды одинаковы. Поэтому код Бергера хуже справляется с детектированием однократной ошибки по сравнению с кодом повторения. Хеммингово расстояние у кода Голея наибольшее, соответственно этот код наилучшим образом детектирует сбои.

Стоит отметить, что ошибки вносятся не в информационные и контрольные разряды, а в саму схему, из-за чего количество пропущенных ошибок в схемах контроля становится больше. Неисправность логического элемента может выдать ошибки большей кратности на выходном векторе по сравнению с кратностью внедряемой ошибки.

В последнем эксперименте исследовалась эффективность различных схем функционального контроля в условиях вероятностной модели возникновения ошибок Фон-Неймана. На рис. 5 представлены графики, отражающие зависимость доли пропущенных ошибок от вероятности сбоя логических элементов для разных видов схем контроля. Доля пропущенных ошибок для каждой вероятности сбоя – это среднее значение, взятое по всем тестируемым схемам.

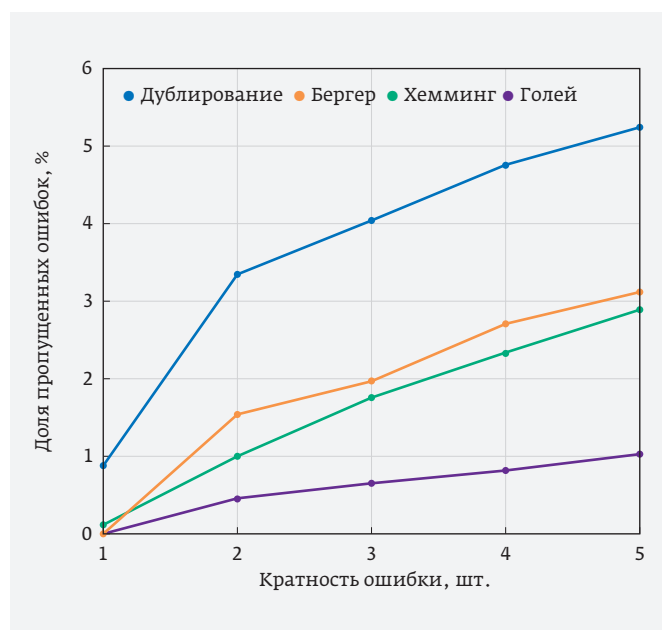


Рис. 4. Зависимость доли пропущенных ошибок от кратности внедряемой ошибки для разных схем контроля

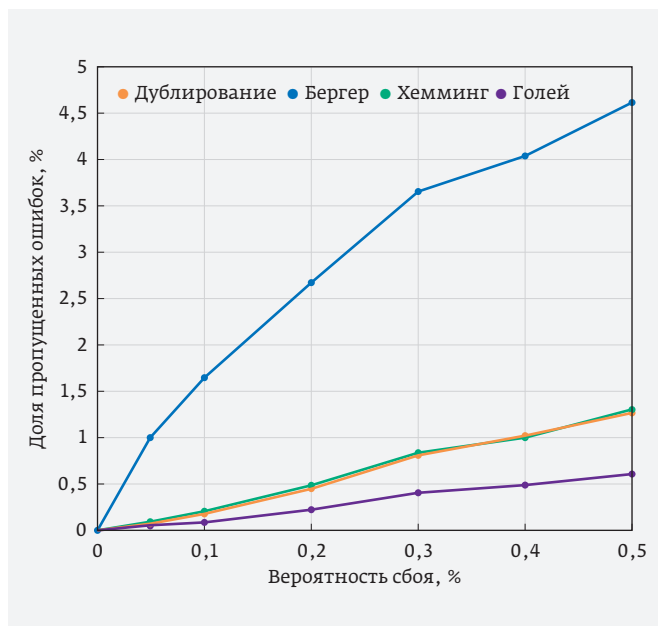


Рис. 5. Зависимость доли пропущенных ошибок от вероятности сбоя логических элементов для разных схем контроля

Из графиков видно, что наименьшая доля пропущенных ошибок у схем контроля на основе кода Голея.

ВЫВОДЫ

В рамках работы разработан программный комплекс для автоматизации проектирования схем функционального контроля. Проведены исследования эффективности помехоустойчивых кодов в контексте создания систем функционального контроля, обнаруживающих ошибки. Эффективность оценивалась по критериям аппаратурной избыточности, а также обнаруживающей способности в условиях различных моделей ошибок.

В результате проведенных исследований было выявлено:

1. Наименьшими структурными затратами обладают схемы дублирования, затем (в порядке возрастания количества используемых элементов) идут схемы контроля на основе кодов Хемминга, Бергера и Голея.
2. С увеличением количества выходов контролируемой комбинационной схемы растет разница в количестве используемых элементов между схемами контроля на основе кодов Бергера, Хемминга, Голея и дублированием.
3. Схемы контроля на основе кода Голея и дублирования не пропускают ни одной однократной ошибки.

4. Схемы контроля на основе кода Голея пропускают наименьшее количество ошибок кратности большей, чем единица.
5. В рамках вероятностной модели ошибок наилучшие показатели в соответствии с критерием пропуска ошибок у схем контроля на основе кода Голея.

В соответствии с критериями структурная избыточность и обнаруживающая способность наилучшей схемой контроля для детектирования однократных ошибок является схема дублирования. Наилучшей схемой контроля для детектирования многократных ошибок является схема контроля на основе кода Голея, если количество выходов контролируемой комбинационной схемы не более двадцати двух, в противном случае следует использовать схему дублирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-08-00241.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Стемпковский А.Л., Тельпухов Д.В., Соловьев Р.А., Тельпухова Н.В.** Исследование вероятностных методов оценки логической уязвимости комбинационных схем // Проблемы разработки перспективных микро- и нано-электронных систем / Под общ. ред. акад. РАН А. Л. Стемпковского. – М.: ИПИМ РАН, 2016. Ч. 4. С. 121–126.
2. Accurate reliability analysis of concurrent checking circuits employing an efficient analytical method / T. An [and others] // *Microelectronics Reliability*. 2015. Vol. 55. P. 696–703.
3. Asadi H., Tahoori M.B., Fazeli M., Miremadi S.G. Efficient algorithms to accurately compute derating factors of digital circuits // *Microelectron Reliability*. 2012. Vol. 52(6):12. P. 15–26.
4. **George N., Lach J.** Characterization of logical masking and error propagation in combinational circuits and effects on system vulnerability // *Dependable Systems Networks (DSN)*, 2011 IEEE/IFIP 41st International Conference on, 2011, p. 323–334.
5. **Ефанов Д.В.** Три теоремы о кодах Бергера в схемах встроенного контроля // *Информатика и системы управления*. 2013. № 1(35). С. 77–86.

6. **Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д.В., Блюдов А.А.** Применение кодов Бергера и Хэмминга в схемах функционального контроля // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2013. № 2 (35). С. 168–182.
7. **Ефанов Д. В.** Предельные свойства кода Хемминга в схемах функционального контроля // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. № 3(29). С. 71–79.
8. **Блейхут Р.** Теория и практика кодов, контролируемых ошибок. – М.: Мир, 1986. 576 с.
9. **Вернер М.** Основы кодирования. – М.: Техносфера, 2004. 288 с.
10. **Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В., Дмитриев В.В., Хуан Ц.** Оптимальный систематический код на основе взвешивания разрядов информационных векторов и суммирования без переносов для систем функционального контроля // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2016. № 1(46). С. 75–84.
11. **Ефанов Д. В., Блюдов А.А.** Коды Хемминга и их обнаруживающие способности в схемах функционального контроля // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2012. № 2(32). С. 100–111.
12. **Ефанов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вал.В.** О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля // Автоматика и телемеханика. 2010. № 6. С. 155–162.
13. **McCluskey Edward J.** Which concurrent error detection scheme to choose? [Электронный ресурс] / Edward J. McCluskey, Mitra Subhasish // Center for Reliable Computing, Stanford University, 2000.

МЕМРИСТИВНЫЕ ДВУМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ – НОВЫЙ ТИП ЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ И ПАМЯТИ

► Г. Н. Панин^{1, 2}

¹ИПТМ РАН, ²ИЦКП, НИТА, ДГУ

Представлен обзор новых резистивных переключателей и памяти на основе атомарных двумерных кристаллов. Особое внимание уделено концепции самоорганизованных синапсоподобных мемристивных систем для информационных устройств и нейроморфных вычислений. Рассмотрен новый тип мемристора с фотозатвором, управляемый электрически и оптически в широком диапазоне длин волн, который может быть использован для решения большого круга задач, связанных с обработкой изображений, распознаванием образов, звуков, движений, речи, необходимых для создания искусственного интеллекта.

MEMRISTIVE ELECTRONIC SYSTEMS – A NEW TYPE OF ELECTRONIC LOGIC SWITCHES AND MEMORY

G. N. Panin^{1, 2}

¹IMT RAS, ²QSRC, NITA, DGU

An overview of new resistive switches and memory based on atomic two-dimensional crystals is presented. Particular attention is paid to the concept of self-organized synapse-like memristive systems for information devices and neuromorphic computations. A new type of memristor with a photo-gate, controlled electrically and optically over a wide range of wavelengths, can be used to solve a wide range of tasks related to image processing, image recognition, sounds, movements and speech recognition needed to create artificial intelligence.

ВВЕДЕНИЕ

Мемристивные электронные системы подобные биологическим синапсам в нейронных сетях рассматриваются как новый тип электронных логических переключателей и памяти с чрезвычайно низким потреблением энергии и занимаемой площадью. Эти новые электронные компоненты могут решить проблему физического и технологического пределов современной технологии CMOS и элементной базы для создания искусственного интеллекта и, возможно, сознания. Уникальные электронные и оптические свойства недавно открытых атомарных двумерных кристаллов, таких как графен, оксид графена, дисульфид молибдена и др., демонстрируют огромный потенциал для проектирования нано- и биоэлектроники сверхвысокой плотности для инновационных информационных систем.

В статье представлено современное состояние мемристивных систем, передача сигнала в которых подобна прохождению сигнала в биологических нейронных сетях. Двумерные (далее 2D) мемристоры могут решить одну из основных проблем технологии современной цифровой электроники, связанную с пределом уменьшения размера транзистора. Основное внимание будет уделено 2D энергонезависимой резистивной памяти на основе 2D-кристаллов графена/оксида графена (далее G/GO), молибдена, которая биосовместима и позволяет использовать нейроморфную архитектуру для аналоговых вычислений и технологию самосборки. В качестве эффективного метода изготовления двумерных мемристоров с фоторезистивным переключением для энергонезависимой памяти сверхвысокой емкости рассмотрено фотокаталитическое и электронно-

лучевое окисление-восстановление графена/оксида графена. Новый тип многофункционального мемристора с фотозатвором, управляемого электрически и оптически в широком диапазоне длин волн, может быть использован для решения большого круга задач обработки изображений, распознавания образов, звуков, движений и речи, необходимых для создания искусственного интеллекта.

МЕМРИСТОР

Понятие мемристора, как нелинейного резистивного элемента, было введено Леоном Чуа (Leo Chua) в 1971 году для описания недостающего четвертого базового элемента электрической цепи [1]. Мемристор вместе с другими известными элементами схемы, такими как конденсатор, резистор и катушка индуктивности, мог описать нелинейные эффекты в твердотельной электронике, которые были уже хорошо известны. В 1922 году российский ученый Олег Лосев впервые наблюдал отрицательное дифференциальное сопротивление в 2-электродном точечном приборе – кристадине, который использовался позднее для генерации сигнала в радиостанциях в разных странах мира. Кристадин позволял работать на частотах до 100 МГц, в то время не мыслимых и не понятных для применений. В 1957 году Лео Эсаки продемонстрировал независимо подобное устройство – туннельный диод и в 1973 году получил за открытие этого эффекта Нобелевскую премию. В 1942 году Олег Лосев усовершенствовал кристадин, добавив к нему третий электрод, который мог управлять током в этом приборе. Статья о новом нелинейном трехэлектродном приборе, отправленная О. Лосевым в *Physical Review* из блокадного Ленинграда, затерялась и не была опубликована. Но интерес к этой тематике был и в других лабораториях. В 1948 году Джон Бардин из Bell Labs получил патент на точно-контактный трехэлектродный элемент [2] и совместно с Уолтер Браттейном описал физические принципы транзисторного эффекта [3–7]. В 1956 году за открытие транзисторного эффекта Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн получили Нобелевскую премию по физике.

Интерес к нелинейному 2-электродному прибору, мемристор, резко возрос в 2008 году, когда

мемристор был обнаружен экспериментально в лаборатории HP [8]. Этот прибор состоял из двух наноразмерных областей, легированной и нелегированной, относительное смещение которых контролировало состояния включения и выключения прибора. Первая матрица мемристоров была изготовлена на основе TiO_2 на чипе CMOS в лаборатории HP в 2012 году.

Мемристор с двумя платиновыми электродами представлял собой нелинейный динамический прибор, сопротивление которого зависело от величин электрического поля и протекающего тока (рис. 1). Этот нелинейный прибор позволял формировать энергонезависимые состояния, позволяющие хранить информацию при выключенном напряжении питания, обладал возможностью получения ультравысокой плотности записи (до 1 Tb на кристалл), низкой энергией переключения, высокой скоростью работы (нс), длительным временем хранения информации, а также возможностью многоуровневой записи с помощью дискретных или непрерывных состояний.

Мемристор является запоминающим резистором с переменным сопротивлением и описывается зависящей от потока и поля проводимостью. Fujitsu Semiconductor совместно с Panasonic Semiconductor в 2016 году продемонстрировали серийный продукт 4Mb RRAM.

Использование нелинейного динамического подхода позволяет прежде всего эффективно решать ряд сложных вычислительных задач, связанных, например, с обработкой изображений и распознаванием образов. Коммерческий продукт компании Toshiba Smart Photo Sensor с универсальным чипом

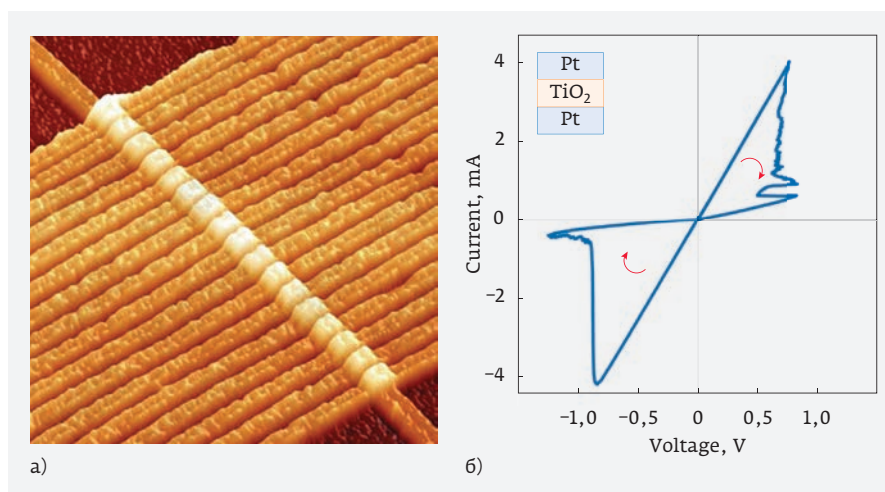


Рис. 1. Мемристоры на чипе CMOS (HP 2012) и ВАХ Pt/TiO₂/Pt мемристора

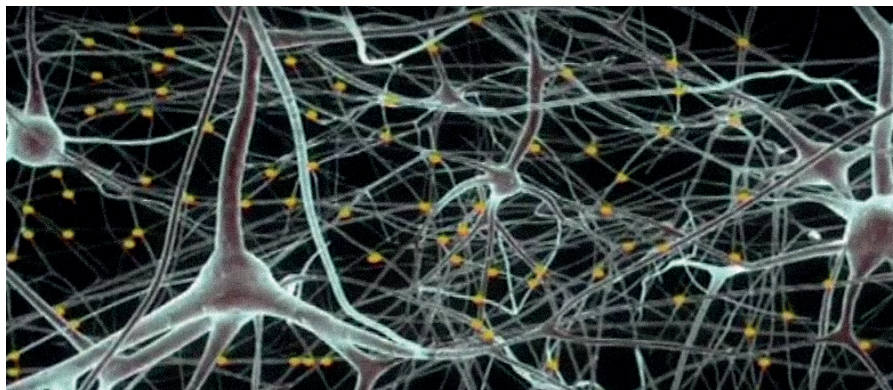


Рис. 2. Нейронная сеть

на основе клеточной нейронной сети (CNN) способен обрабатывать изображения, подобно человеческому мозгу, что позволяет вычислять элементарные задачи распознавания изображений за наносекунды. Было показано, что CNN-чип настолько быстр, что с его помощью можно обнаружить пулю в полете и иметь достаточно времени, чтобы запрограммировать другую пулю, для того чтобы сбить ее.

Мемристоры, которые подобны синапсам в биологических нейронных сетях, могут стать элементной базой для создания высокоэффективных интеллектуальных машин и компьютеров с нейроморфной архитектурой, подобной мозгу. Известно, что мозг человека, содержащий 10^{10} нейронов и 10^{14} синапсов (рис. 2), обрабатывает информацию аналогово и потребляет при этом всего около 20 Вт. Современному суперкомпьютеру с цифровой обработкой информации для имитации работы нейронной сети размером всего 1% от количества нейронов человеческого мозга необходимо около 10 МВт. А для имитации работы человеческого мозга в течение 1 с суперкомпьютеру «К Computer» (до 10-ти петафлопс, 1016 млрд операций в секунду, 1 Петабайт оперативной памяти) – разработка японской корпорации Fujitsu – необходимо около 40 мин.

Аналоговый процессор на основе мемристивных нейроморфных систем является более эффективным, чем современные цифровые суперкомпьютеры. Важную роль в этом играют особые процессы передачи сигнала в нейронных сетях, которым уделено много внимания исследова-

телей. Так в 2000 году была присуждена Нобелевская премия по физиологии и медицине Арвиду Карлссону, Полю Грингарду и Эрику Р. Канделлу за «открытия в отношении передачи сигналов в нервной системе». Нейронные сети обладают ассоциативной памятью и способностью к глубокому обучению, знания о которых были заложены еще в работах русского физиолога Ивана Павлова, который в 1904 году получил Нобелевскую премию по физиологии. Изучение пищева-

рения натолкнуло его на идею условных рефлексов. Такие благоприобретенные рефлексы возникают при определенных условиях и исчезают, когда условия не соблюдаются.

АТОМАРНЫЙ ДВУМЕРНЫЙ КРИСТАЛЛ ГРАФЕН

Графен – кристаллический двумерный слой углерода толщиной в один атом (рис. 3). Огромный интерес к этому материалу появился в 2004 году после совместной публикации исследователей из ИПТМ РАН и Манчестерского университета об эффекте электрического поля в атомно-тонких углеродных пленках [9]. Шесть лет спустя в 2010 году Андрею Гейму и Константину Новоселову была присуждена Нобелевская премия по физике за «новаторские эксперименты в отношении 2D-материала графена».

Графен состоит из двух симметричных подрешеток углерода, образующих конус Дирака линейной дисперсии энергии электронов, которые называют дираковскими фермионами. Особенность этих

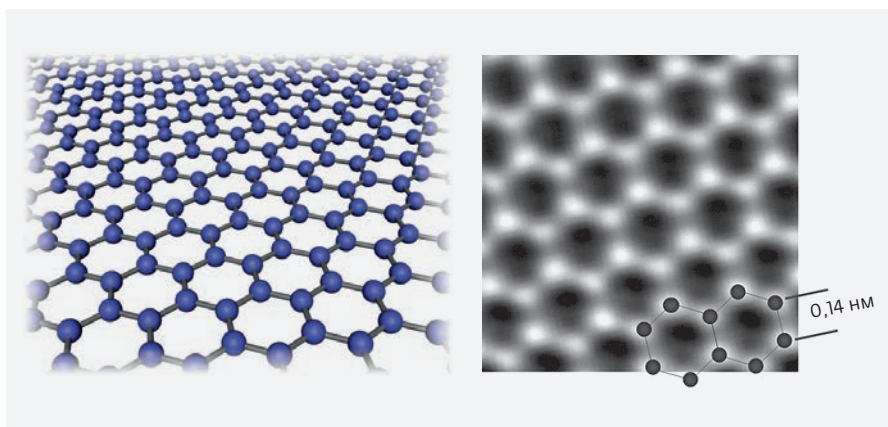


Рис. 3. Кристаллическая решетка графена

частиц в том, что они безмассовые и ведут себя как фотоны. Вследствие этого графен демонстрирует магические свойства. Графен прозрачный (97,7%), устойчивый к чрезвычайно высокой плотности электрического тока (миллион раз выше, чем у меди), имеет самую высокую подвижность электронов из известных материалов ($\sim 10^6 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$, на три порядка выше, чем в кремнии) и очень высокую теплопроводность ($\kappa > 5 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – выше, чем у алмаза). Графен – растяжимый материал (25%) с уникальной механической прочностью $E > 10^{12} \text{ Па}$ (в 6 раз выше, чем у стали). Кроме того, графен демонстрирует очень хорошую биосовместимость.

МЕМРИСТОР НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА / ОКСИДА ГРАФЕНА

В 2010 году исследователями из ИПТМ РАН и Донгук университета был продемонстрирован мемристор на основе графена/оксида графена (далее G/GO), который переключался при напряжении 0,7 В и токе 1 нА, с соотношением сопротивлений во включенном/выключенном состоянии порядка 10^3 (рис. 4) [10–11].

Метод индуцированного электронным пучком тока позволил выявить с высоким пространственным разрешением формирование случайно распределенных токовых нитей (рис. 5) и изучить механизм переключения в этом приборе подобном синапсу.

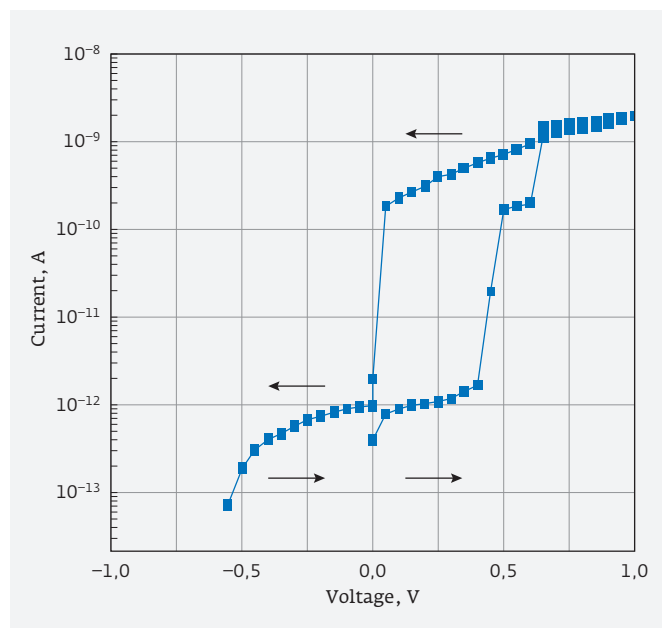


Рис. 4. Резистивное переключение структуры Al/GO/Al, предварительно сформированной при 5 В [11]

Сопротивление этого устройства, подобного синапсу, изменялось нелинейно в электрическом поле, а значения высокого и низкого сопротивления были энергонезависимыми.

МЕХАНИЗМ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В G/GO

Механизм резистивного переключения в G/GO подробно изучался в ряде работ [10–15], в которых было показано, что миграция кислородсодержащих групп в GO играет важную роль. Одна sp^3 углерод-кислородная или углерод-гидроксильная связь на 10^6 sp^2 -связей уменьшала проводимость, например, в углеродных наноматериалах на 50% [16]. Оксид графена с sp^3 -конфигурацией углерода, обладающий низкой электрической проводимостью, переключался в электрическом поле локально в sp^2 -конфигурацию

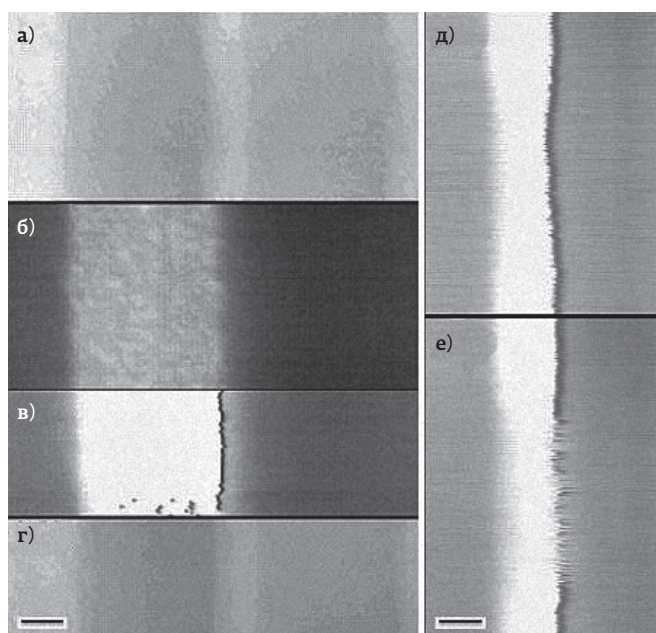


Рис. 5. SEM-REBIC-изображения структуры Al/GO/Al с модуляцией встроенного потенциального барьера вблизи отрицательно смещенного Al-электрода при различных напряжениях смещения (V_b) и формирования (V_f) (а) $V_b=0$; $V_f=0$ (режим SE); (б) $V_b=0$; $V_f=0$ (режим REBIC); (в) $V_b=0$; $V_f=5$ В (режим REBIC); (г) $V_b=0$; $V_f=5$ В (режим SE); (д) $V_b=0,2$ В; $V_f=7$ В (режим REBIC); (е) $V_b=0,5$ В; $V_f=7$ В (режим REBIC, та же область, что и в (д)). Масштабная метка 100 мкм (д) и (е), 50 мкм в (а) – (г). Изображения в (а) – (г) были получены путем последовательного переключения сигналов вторичных электронов (SE) и индуцированного тока (REBIC) во время сканирования электронного пучка

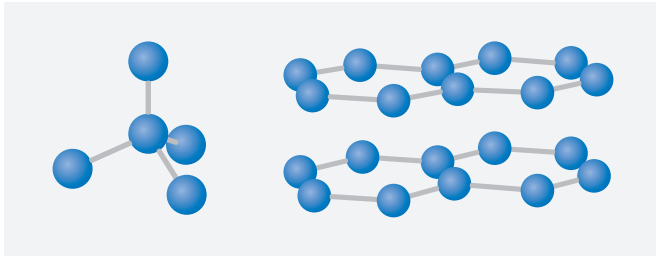


Рис. 6. sp^3 (слева) и sp^2 (справа) конфигурации углерода

углерода (рис. 6), которая приводила к высокой электрической проводимости.

Этот процесс может контролироваться как адсорбцией / десорбцией кислорода, так и миграцией связанных с кислородом групп.

САМООРГАНИЗАЦИЯ МЕМРИСТОРОВ НА ОСНОВЕ G / GO

Фотокаталитическое окисление графена покрытого слоем наночастиц ZnO размером в 10–15 нм в условиях ультрафиолетового (далее УФ) облучения привело к формированию самоорганизованных мемристоров G / GO с очень высокой плотностью (10^{12} см^{-2}) [14, 15]. На рис. 7 показана схема фотокаталитического окисления графена с ZnO-наночастицами. 2–3-слойный графен, покрытый частицами, облучался в потоке влажного воздуха при комнатной температуре или выше (80 °C) с использованием кварцевой УФ-лампы со световым потоком $0,03 \text{ J min}^{-1} \cdot \text{см}^2$. Свет с длиной волны, превышающей 365 нм, фильтровали. Время ультрафиолетового облучения варьировали от 5 до 90 мин. После ультрафиолетовой обработки наночастицы ZnO растворяли в разбавленной 0,1 М HCl, графеновую подложку промывали деионизированной водой и сушили в азоте.

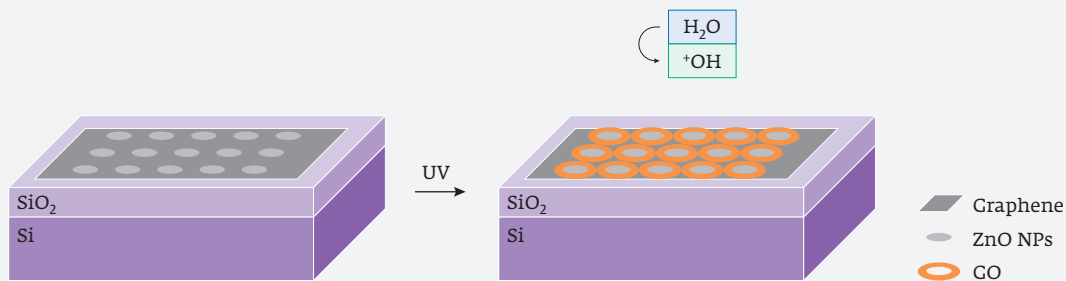


Рис. 7. Схема фотокаталитического окисления графена, покрытого ZnO наночастицами под ультрафиолетовым светом для формирования G / GO гетероструктур на подложке Si / SiO₂ [15]

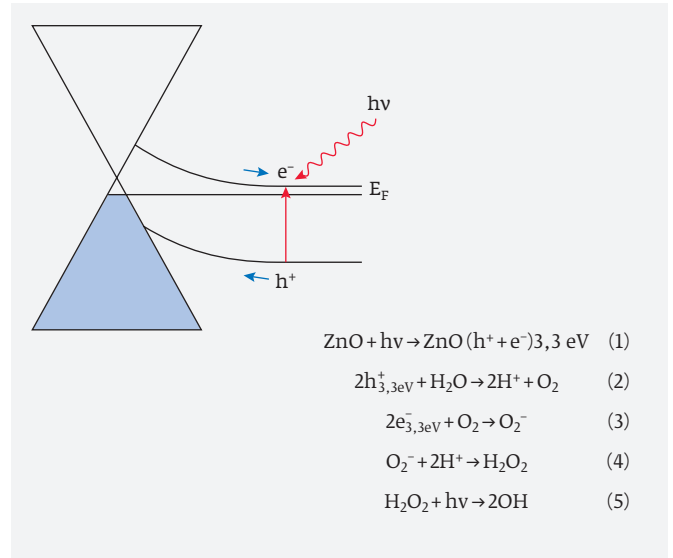


Рис. 8. Схематическая электронная диаграмма G / ZnO-интерфейса под УФ-облучением. Электронно-дырочные пары, генерируемые в ZnO (3,3 эВ) при УФ-облучении (реакция 1) разделяются во встроенном электрическом поле на интерфейсе G / ZnO, обеспечивая поток дырок к графену [15]

ZnO-наночастицы играют ключевую роль в процессе фотоокисления графена. На рис. 8 показана электронная диаграмма графен (G) / ZnO-интерфейс при УФ-облучении. Изгиб зон вверх в наночастицах ZnO вызван более низкой работой выхода электронов в ZnO (3,6 эВ) по сравнению с графеном (4,5 эВ). Электронно-дырочные пары, генерируемые в ZnO (3,3 эВ) при УФ-облучении (реакция 1) разделены во встроенном электрическом поле на интерфейсе G / ZnO, что обеспечивает поток дырок (3,3 эВ) к графену. В результате графен декорируется высоко реактивными гидроксильными радикалами ($\cdot \text{OH}$) через

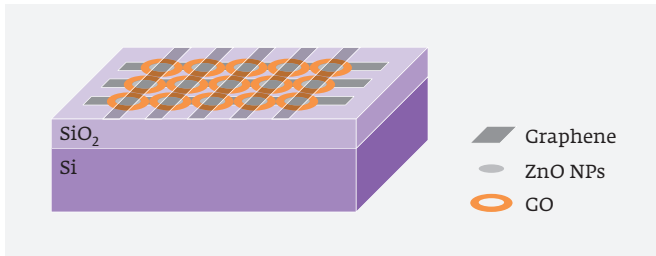


Рис. 9. Схема массивов фотомемристоров G/GO в вертикальной геометрии, полученных фотокаталитическим окислением графена с наночастицами ZnO [15]

O_2 и H_2O_2 (реакции 3-5) процессы фоторазложения молекул воды из влажного воздуха.

МЕМРИСТОРЫ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА С ПЛАВАЮЩИМ ФОТОЗАТВОРОМ УЛЬТРАВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

Контроль распределения наночастиц ZnO на графене с хорошо воспроизводимым размером (10-15 нм) позволяет создавать высокомасштабируемые наногетеропереходы G/GO для памяти сверхвысокой плотности (до 10^{12} см⁻² или 1 Тб на чипе для вертикальной геометрии пересекающихся электродов, рис. 9).

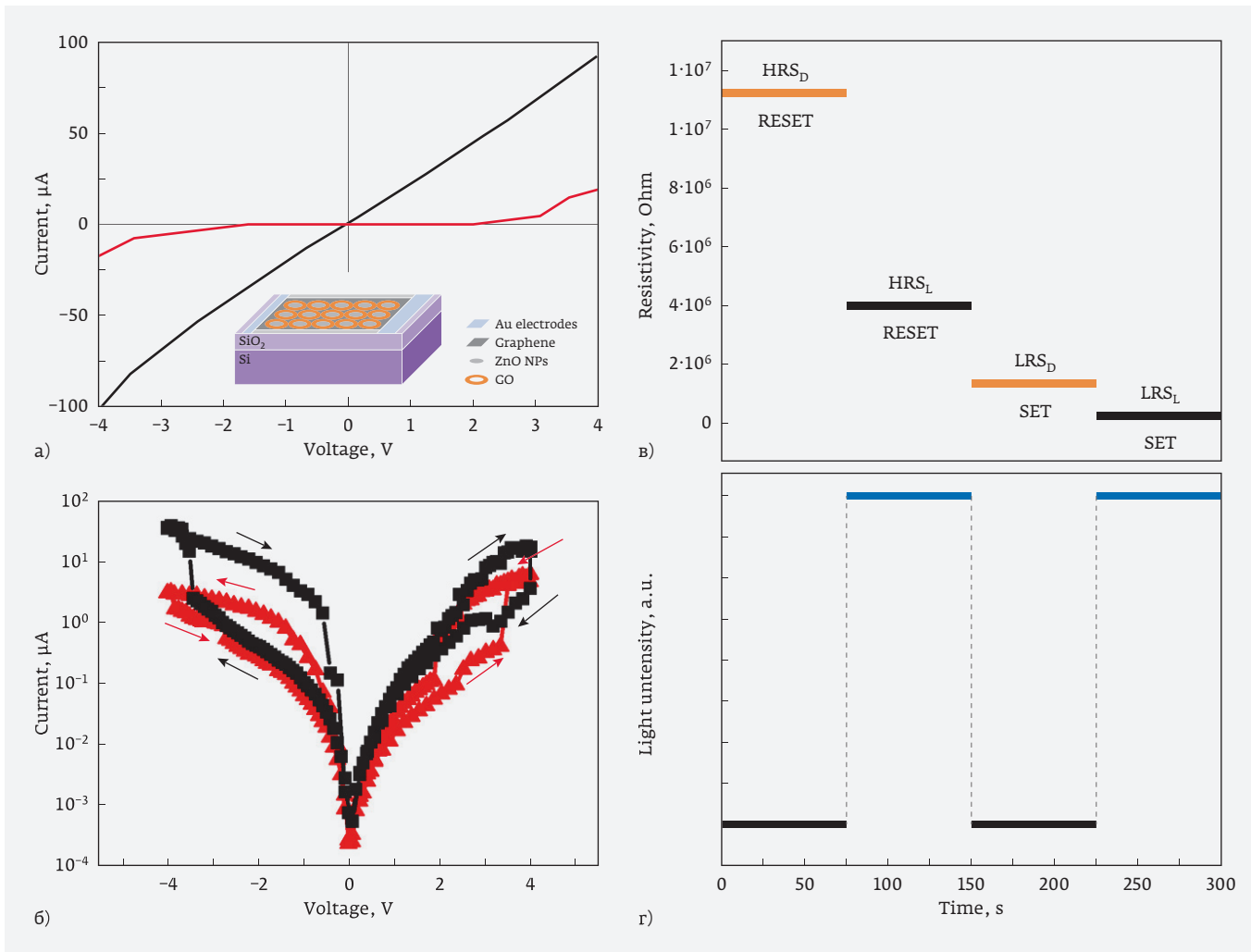


Рис. 10. а – ВАХ структуры 2-3 слоя G/ZnO до (черный) и после (красный) фотокаталитического окисления во влажном воздухе в течение 30 мин при комнатной температуре. Вставка-схема для измерения структуры с латеральными золотыми электродами; б – характеристики I-V для G/GO-наноструктуры, предварительно поляризованной (+5 В, 15 мин) при освещении белым светом (черный) и в темноте (красный); в – резистивные состояния G/GO-фотомемристора, которые переключаются напряжением Set / Reset –3,8/3,3 В в темноте и –3,5/4 В под импульсами белого света (г) и считываются при 2,5 В [15]

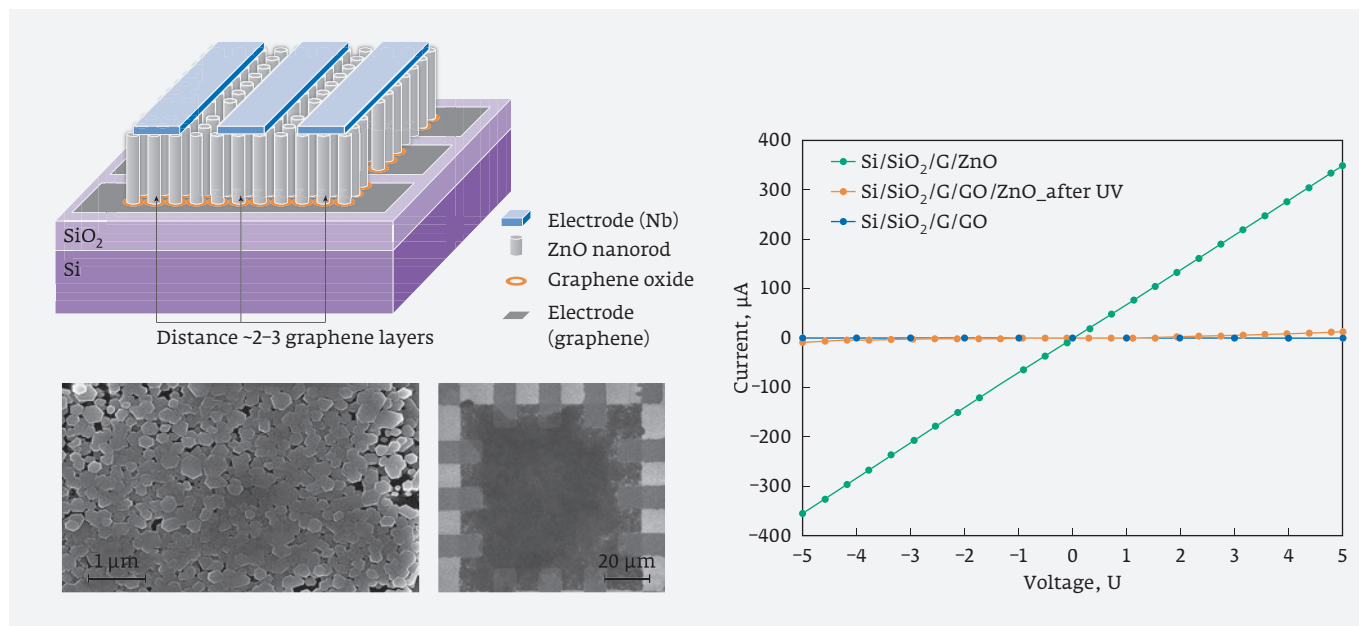


Рис. 11. Схема массивов фотомемристоров G/GO/ZnO-наностержней в вертикальной геометрии (слева сверху) и СЭМ-изображения структур (слева внизу) с их вольт-амперными характеристиками (справа) [14]

Мемристоры с плавающим фотозатвором могут электрически считываться с или без оптического возбуждения. Кривая I-V образца графена до окисления демонстрирует линейное поведение и высокую проводимость графена (рис. 10а, черный). Фотокаталитический процесс приводит к уменьшению тока через образец на два порядка и нелинейное поведение, указывающее на образование в окисленном графене запрещенной зоны (рис. 10а, красная кривая) [15].

Повышение температуры влажного воздуха уменьшает время окисления графена. Гетероструктуры G/GO, полученные фотокаталитическим окислением при продувании влажного воздуха при комнатной температуре в течение 30 мин и при 80 °C в течение 5 мин демонстрируют нелинейное поведение с шириной зоны GO около 3 эВ, которая уменьшает проводимость окисленного графена на два порядка по сравнению с графеном. Сформированные наноструктуры G/GO демонстрировали хорошую фоточувствительность к белому свету и фоторезистивное переключение. Фототок увеличивался примерно в шесть раз при напряжении смещения большем, чем 3 В. Это указывает на то, что пары электрон-дырки, генерируемые светом, эффективно разделяются в смещенных гетеропереходах G/GO. На рис. 10б показаны I-V характеристики предварительно обработанной наноструктуры G/GO (+5 В, 15 мин) при развертке напряжения от -4 В до 4 В под

белым светом (черный) и в темноте (красный). Хорошо воспроизводимый биполярный гистерезис указывает на резистивное переключение структуры с отношением токов включения и выключения около 10 для четырех различных резистивных состояний HRSD, LRSD и LRSL, HRSL в темноте и на свету при переключающих напряжениях -3,8/3,3 В (Reset/Set) и -3,5/4 В (Set/Reset), соответственно (рис. 10в-г).

Для формирования вертикальных мемристивных структур вместо наночастиц могут быть использованы также ZnO-наностержни, выращенные на графене (рис. 11) [14].

Вертикальная структура G/GO/ZnO-наностержней (далее НС) позволяет избирательно возбуждать УФ-светом 380 нм. Резистивное переключение в гетероструктурах G/GO/ZnO НС наблюдалось при напряжениях <1 В с отношением состояний высокое/низкое сопротивление 10³ после процесса формирования при 1 В (рис. 12).

Структура резистивной памяти на основе графена и ZnO НС перспективна для приборов вертикальной памяти с высокой плотностью и с низким энергопотреблением.

G/GO-МЕМРИСТОРЫ, СФОРМИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Электронно-лучевой (далее ЭЛ) отжиг GO стимулирует радикальный механизм восстановления GO

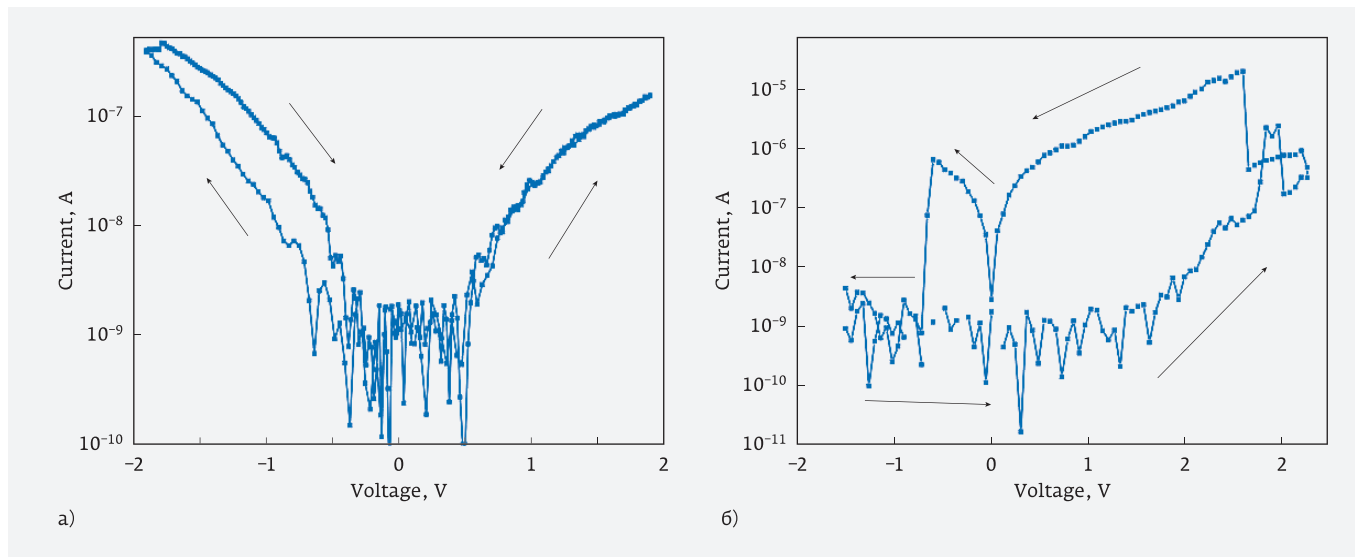


Рис. 12. ВАХ вертикальной структуры G/GO/ZnO в полулогарифмическом масштабе (а) без формирования и (б) после процесса формирования структуры [14]

путем образования горячих электронов. Эти электроны разрушают слабые связи С-О и С-Н (по сравнению с С-С) и образуют высокореактивные радикалы О· и Н·, которые рекомбинируют в H₂O, H₂, O₂, а нескомпенсированный заряд в GO используется для восстановления углеродной связи sp². Следует отметить, что процесс отжига электронным пучком возбуждает электронную подсистему выборочно, а энергия генерируемых горячих электронов может быть резонансно поглощена функциональными группами оксида графена. Для удаления групп кислорода требуется несколько эВ, что сопоставимо с энергией между орбиталями. Первичные электроны пучка являются высокоэнергетическими и могут участвовать в отжиге только через процесс поглощения энергии оксидом графена с образованием горячих электронов с энергией, близкой к ширине запрещенной зоны GO (E_g). Электронно-стимулированный отжиг GO может происходить за счет генерации в этом материале (E_g=1-6 эВ) высокой концентрации заряженных носителей (электронный пучок с энергией электронов 3-10 кэВ создает 10³ электронно-дырочных пар). Процесс электронно-стиму-

лированного отжига электронным пучком является более эффективным, чем лазерный отжиг, при котором один фотон производит только одну электронно-дырочную пару, и, следовательно, тепловые эффекты при лазерном отжиге вносят основной вклад.

ЭЛ-отжиг позволяет прямое формирование мемристивных наноструктур rGO/GO с контролируемым восстановлением без использования маски. На рис.13 показано СЭМ-изображение пленки GO

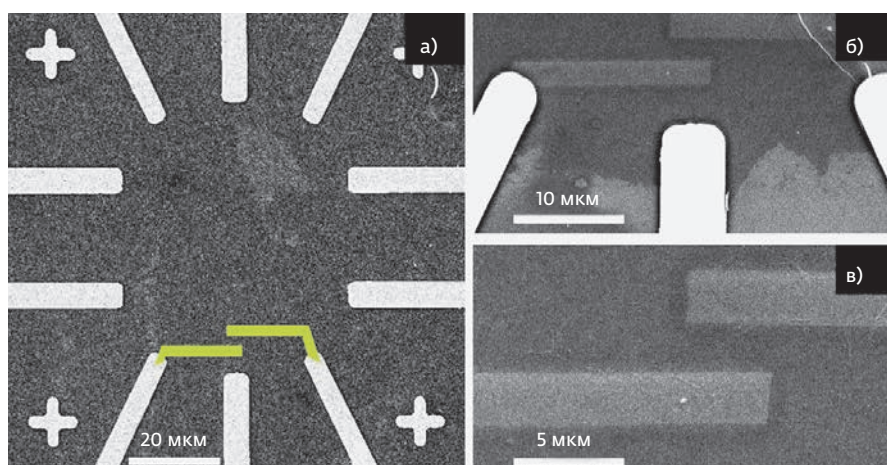


Рис. 13. СЭМ-изображения пленки GO на подложке SiO₂/Si с Pt-электродами (белый) и наложенным рисунком полос (зеленый) для электронно-лучевой «записи» (а) и структуры rGO/GO/rGO после облучения электронным пучком (б, в). Узкие полосы более яркого SEE контраста являются областями восстановленного rGO после облучения

с наложенным рисунком полос (зеленый) для электронно-лучевого экспонирования (а) и изображения планарной структуры rGO/GO/rGO, полученной прямым «рисованием» электронным пучком с дозой $150 \text{ mA} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$ (б, в). Изменение контраста изображения во вторичной электронной эмиссии (SEE) оксида графена после обработки электронным лучом (б, в) указывает на изменение состава и его электронных свойств.

Электронный лучевой отжиг GO позволяет более эффективно формировать резистивную переключающую структуру. Латеральная структура r-GO/GO/r-GO, полученная ЭЛ облучением с дозой $200 \text{ mA} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$, продемонстрировала мягкое резистивное переключение без процесса формирования. Кривая I-V структуры уже после облучения была нелинейной с небольшим гистерезисом (рис. 14а). Процесс формирования при 20 В приводил к увеличению проводимости структуры на несколько порядков и к хорошо выраженной нелинейности. Наблюдался биполярный гистерезис, который указывал на резистивное переключение структуры из высокоомного резистивного состояния (далее HRS) $((1,2 \pm 0,1) \cdot 10^{11} \text{ Ом})$ в низкоомное резистивное состояние (далее LRS) $((6,7 \pm 0,4) \cdot 10^8 \text{ Ом})$ (~2 порядка) при низком напряжении переключения 0,8–0,9 В (рис. 14б). Полученные структуры показали хорошую воспроизводимость с небольшим разбросом напряжений переключения (0,05 ÷ 0,1 В).

МНОГОУРОВНЕВАЯ СВЕРХБЫСТРАЯ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМАЯ ПАМЯТЬ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГРАФЕНА

Память с возможностью хранения более одного бита на ячейку, то есть имеющая многоуровневые состояния памяти, очень привлекательна, поскольку предлагает простой и экономичный путь к увеличенной емкости памяти (например, современный CMOS NAND-Flash обычно хранит 2 или 3 бита на ячейку). Объединение такой способности к многоуровневому хранению с чрезвычайно высокой масштабируемостью, особенно эффективно для реализации памяти со сверхвысокими объемами хранения.

Доступ к четырем очень хорошо разделенным и стабильным состояниям памяти в наноразмерных ячейках GO-путем контроля длительности и амплитуды импульса записи был недавно продемонстрирован в компании IBM [17]. Для определения условий успешной записи и стирания многоуровневых состояний памяти в Pt/GO/Ti/Pt были использованы импульсы возбуждения с амплитудами от 2 до 6 В и продолжительностью от 20 до 80 нс и мониторинг результирующего сопротивления ячейки (см. рис. 15а, б).

Ячейки полностью переключались из состояния RESET, которое может рассматриваться как состояние 00, в состояния памяти 01, 10 и 11 с использованием импульсов $-2,5 \text{ В}/60 \text{ нс}$, $-3,5 \text{ В}/60 \text{ нс}$ и $-4,5 \text{ В}/60 \text{ нс}$ соответственно (рис. 15а). Стирание ячеек из 01, 10 и 11 состояний обратно в состояние 00

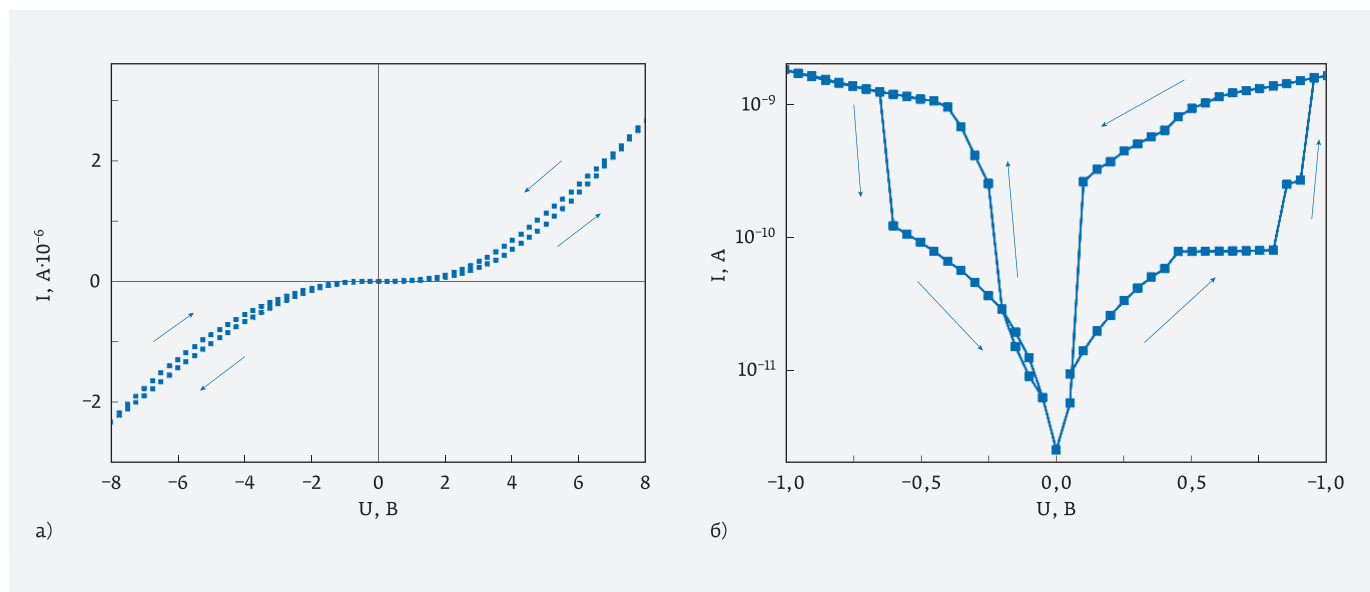


Рис. 14. IV характеристика структуры Pt/GO/Pt после электронного облучения до (а) и после (б) процесса формирования

было успешно достигнуто для импульсов +3 В/60 нс, +4 В/60 нс и +5 В/60 нс соответственно (рис. 15б). Разделения промежуточных уровней сопротивления очень хорошие (см. рис. 15а), что позволяет проводить надежный процесс считывания. Промежуточные уровни показали отличную надежность (рис. 15в), были стабильны со временем (рис. 15г) как на жестких, так и на гибких подложках. Обратимое резистивное переключение, наблюдаемое в этих устройствах, объяснялось миграцией кис-

лорода, которая приводила к изменению проводимости.

МЕМРИСТОР С ПЛАВАЮЩИМ MoS_2 -ФОТОЗАТВОРОМ

Мемристор с плавающим MoS_2 -фотозатвором, поляризованный в электрическом поле со светом и без, демонстрирует многоуровневое переключение [18]. На рис.16 показаны кривые тока-напряжения (I-V) структуры Au/ MoS_2 наносферы/Au после

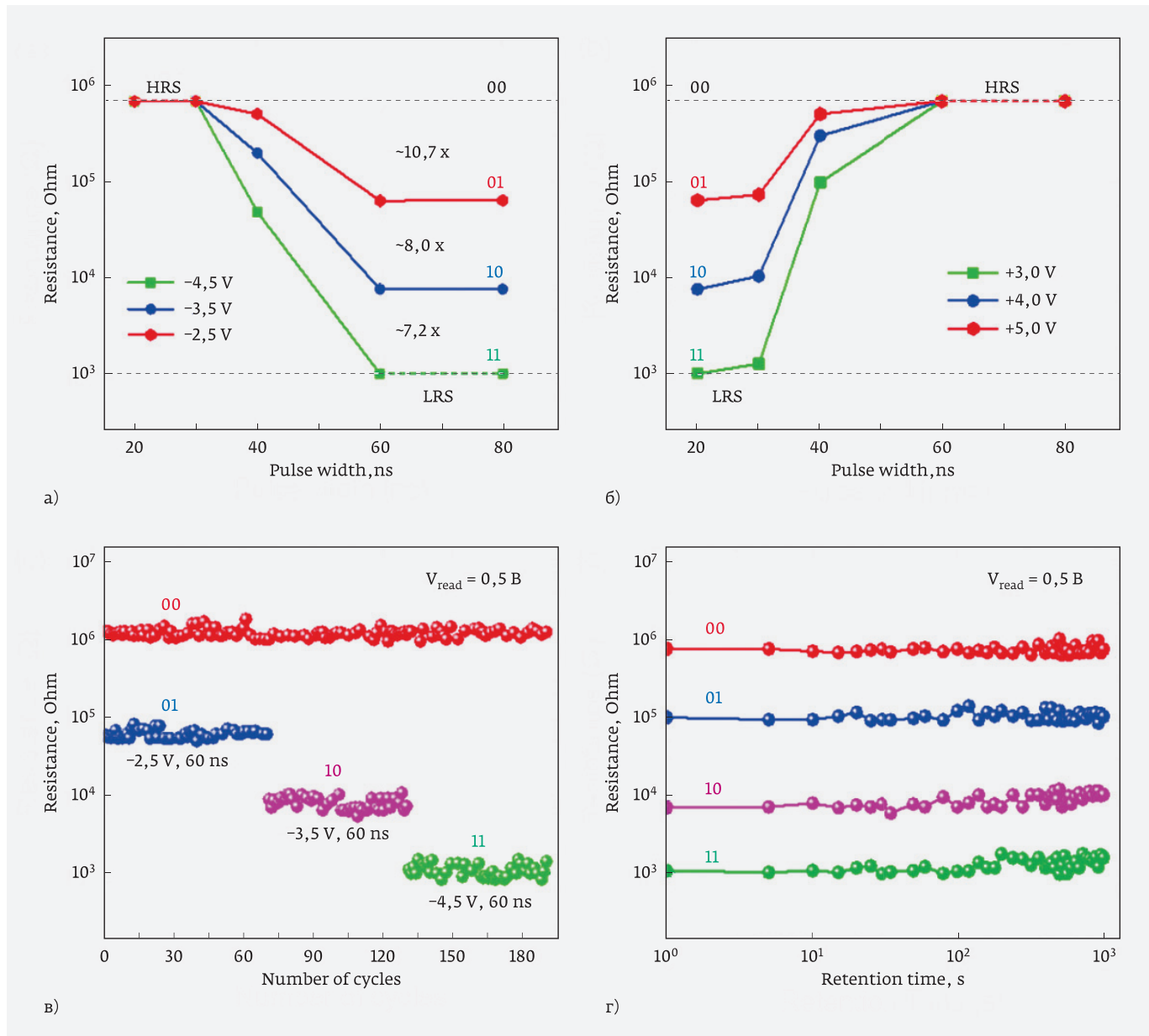


Рис. 15. Запись (а) и стирание (б) многоуровневых состояний в ячейке памяти GO размером 75 нм (слой GO толщиной 8 нм) посредством управления амплитудой и длительностью импульса; надежность (в) и хранение (г) состояний многоуровневой, наномасштабной ячейки оксида графена [17]

развертки напряжения (3 и 6 В) с постоянной скоростью ($0,05 \text{ В с}^{-1}$). Схематическое изображение устройства показано в вставке на рис. 16а. Нелинейные характеристики устройства с выраженным гистерезисом

указывает на мемристивное поведение. Кроме того, мемристивная структура демонстрирует высокий фотоотклик на белый свет (спектральные максимумы при 2,7 и 1,8 эВ), как увеличение

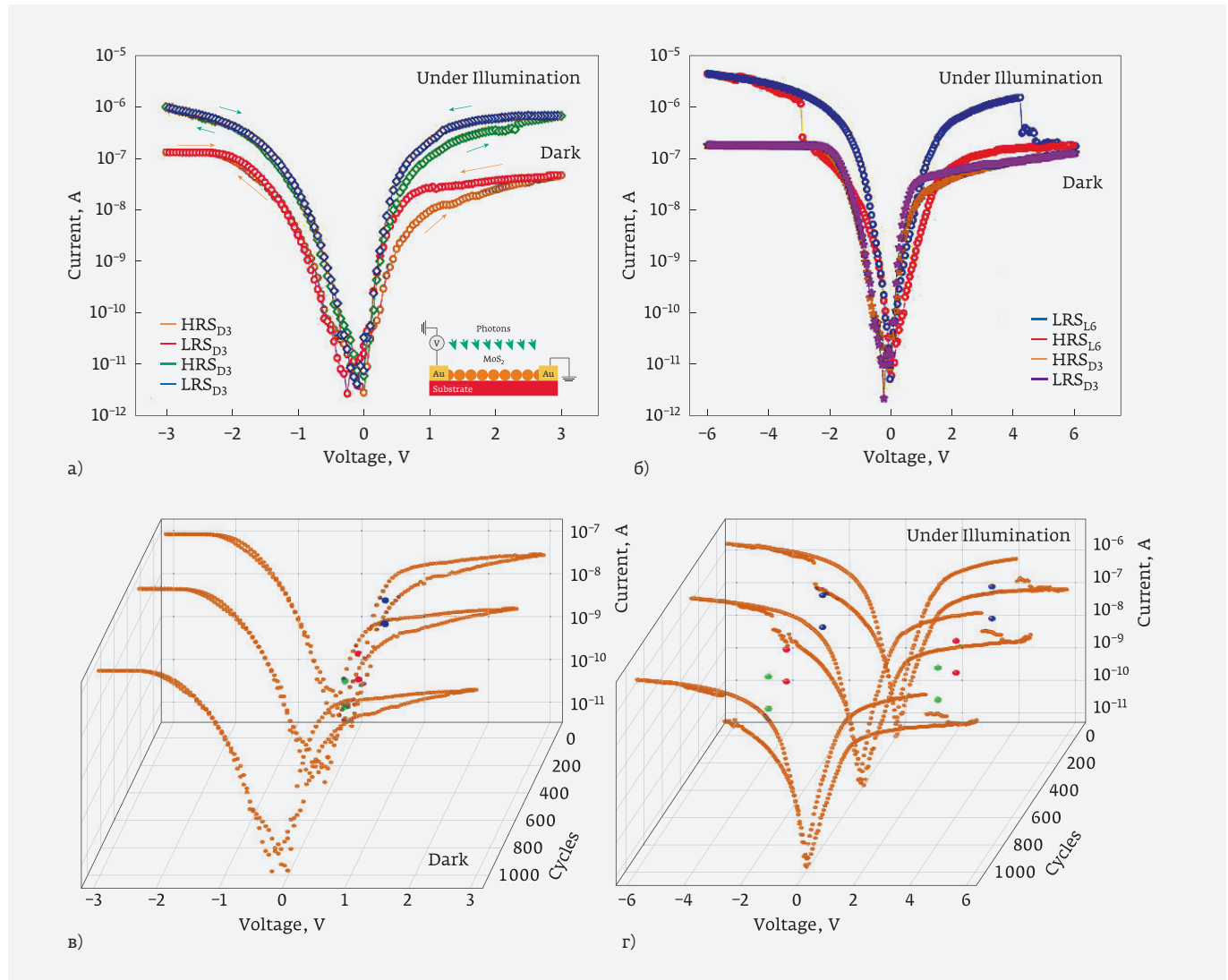
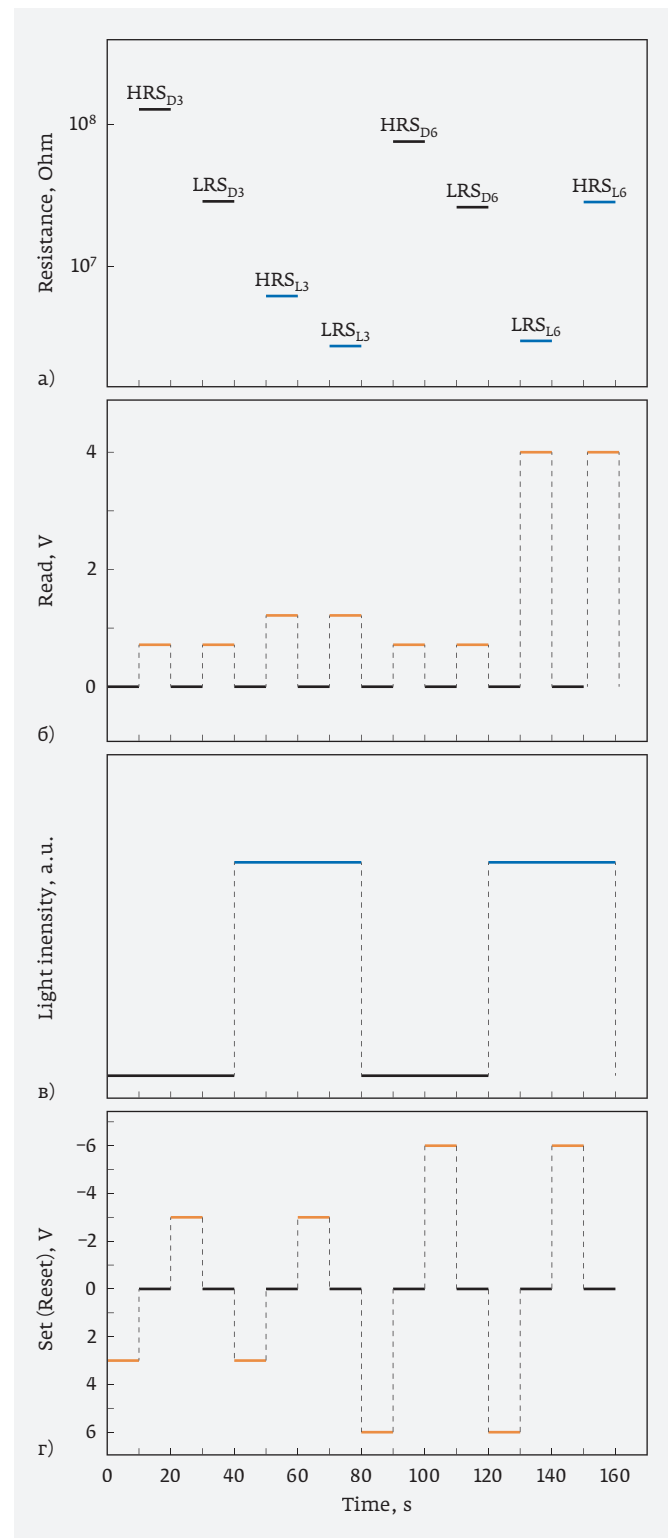


Рис. 16. Резистивное переключение при возбуждении светом (спектральные максимумы при 2,7 и 1,8 эВ) между HRSL6, LRSL6, HRSD6, LRSD6 состояниями. I–V характеристики Au / MoS₂ наносферы / Au мемристора в темноте или под белым светом. Свет со спектральными максимумами при 2,7 и 1,8 эВ был использован в качестве источника белого света. Схема устройства на вставке на рис. 16а. Стрелки на кривых ввода / вывода указывают направление развертки напряжения; а – кривые I–V после развертки напряжения 3 В при постоянной скорости ($0,05 \text{ В с}^{-1}$). Устройство, поляризованное при 3 В, плавно переключается с HRSL3 в LRSL3 под белым светом и из HRSD3 в LRSD3 в темноте с отношением сопротивлений включения / выключения около 2 и 4 при 1,2 и 0,7 В соответственно; б – кривые I–V после развертки напряжения 6 В с постоянной скоростью ($0,05 \text{ В с}^{-1}$). Устройство, поляризованное при 6 В, показывает резкое резистивное переключение при возбуждении белым светом из HRSL6 в LRSL6 при $-2,9 \text{ В}$ с отношением сопротивлений включения / выключения около 10 и плавный переход из HRSD6 к LRSD6 без оптического возбуждения с отношением сопротивлений включения / выключения около 3 при 0,7 В; в – мемристивные характеристики устройства без оптического возбуждения после нескольких циклов; г – мемристивные характеристики устройства при возбуждении белым светом после нескольких циклов [18]

тока 1500 и 2000% при напряжении 3 и 6 В соответственно. Когда устройство поляризовано при 3 В, происходит плавное переключение с HRSL3 на LRSL3 под белым светом и от HRSD3 к LRSD3 в темноте с отношением сопротивлений On/Off около 2 и 4 при 1,2 и 0,7 В соответственно (рис. 16а). При более высоком напряжении формирования (6 В) устройство показывает резкое резистивное переключение при возбуждении белым светом от HRSL6 до LRSL6 при -2,9 В при соотношении сопротивлений включения/выключения около 10 и плавного переключения от HRSD6 до LRSD6 в темноте с отношением сопротивлений включения/выключения около 3 при 0,7 В (рис. 16б). Операция SET от состояния OFF до ON представляет собой процесс записи. Когда приложенное напряжение меняется от 0 до положительного напряжения (4,2 В), структура возвращается к HRSL6. Операция RESET из положения ON в положение OFF действует как функция стирания. Мемристивное поведение устройства в темноте и под белым светом хорошо воспроизводится в процессе итерации до 1000 циклов с отличной стабильностью состояний (рис. 16в, г). Это указывает на то, что можно получить многоуровневое резистивное переключение мемристивной наноструктуры и ее контроль электрическим полем в темноте и при возбуждении белым светом.

Рис. 17. Работа MoS_2 -мемристора, поляризованного при различных напряжениях в темноте или при возбуждении белым светом: а – высокие и низкие резистивные состояния, полученные с использованием операций SET / RESET при -3 В / +3 В и -6 В / +6 В в темноте (HRSD3, LRSD3 и HRSD6, LRSD6) и под белым светом (HRSL3, LRSL3, LRSL6, и HRSL6); б – диаграмма считывания импульсами напряжения. Резистивные состояния считываются при 0,7 В (HRSD3, LRSD3, HRSD6, и LRSD6), 1,2 В (HRSL3 и LRSL3) и 4 В (LRSL6 и HRSL6) в темноте (D) или при возбуждении белым светом (L); в – схема возбуждения импульсами белого света. SET / RESET и операция READ контролируются импульсами света выключено (черные) (HRSD3, LRSD3, HRSD6 и LRSD6) и включено (синий) (HRSL3, LRSL3, HRSL6 и LRSL6); г – мемристор, поляризованный при 3 В, демонстрирует четыре состояния, которые считываются как HRSD3, LRSD3, HRSL3 и LRSL3, тогда как мемристор, поляризованный при 6 В, демонстрирует другие четыре состояния: HRSD6, LRSD6, HRSL6 и LRSL6, которые могут быть прочитаны без оптического возбуждения или при возбуждении белым светом [18]

Следует отметить, что резистивное переключение, управляемое поляризацией наносфер MoS_2 , более быстрый процесс, чем ионный перенос, а частота оптического доступа значительно выше, чем электрическая адресация.



8-УРОВНЕВАЯ МЕМРИСТОРНАЯ СИСТЕМА С ПЛАВЮЩИМ ФОТОЗАТВОРОМ MoS₂

Диаграмма работы 8-уровневой мемристорной системы с плавающим фотозатвором из MoS₂ показана на рис. 17. Диаграмма демонстрирует состояния сопротивления, образованные после операций SET/RESET мемристора MoS₂, поляризованного при напряжениях 3 и 6 В в темноте или при возбуждении светом. Мемристор, поляризованный при 3 В в темноте или при белом свете, демонстрирует четыре состояния, которые надежно считываются при напряжении 0,7 В (HRSD3 и LRSD3) и 1,2 В (HRSL3 и LRSL3) в темноте или при белом свете (рис. 17а).

Поляризация мемристора при 6 В в темноте или при свете приводит к формированию еще четы-

рех состояний, которые считываются при напряжении 0,7 В (HRSD6 и LRSD6) и 4 В (HRSL6 и LRSL6) в темноте или на свету (рис. 17а). Все эти состояния хорошо контролируются электрически при комнатной температуре приложенным напряжением и возбуждением светом, что подтверждается итерационной работой мемристора при различных условиях записи и считывания [18]. Поляризация наносфер в фотомемристоре с использованием импульсов электрического поля и света создают многоуровневые состояния сопротивления. Анализ проводимости в этих состояниях сопротивления показывает, что поляризация наносфер при возбуждении светом приводит к генерации проводящих путей для переключения сопротивления. Сокращение щели между электродами в плоской геометрии или вертикальной может значительно

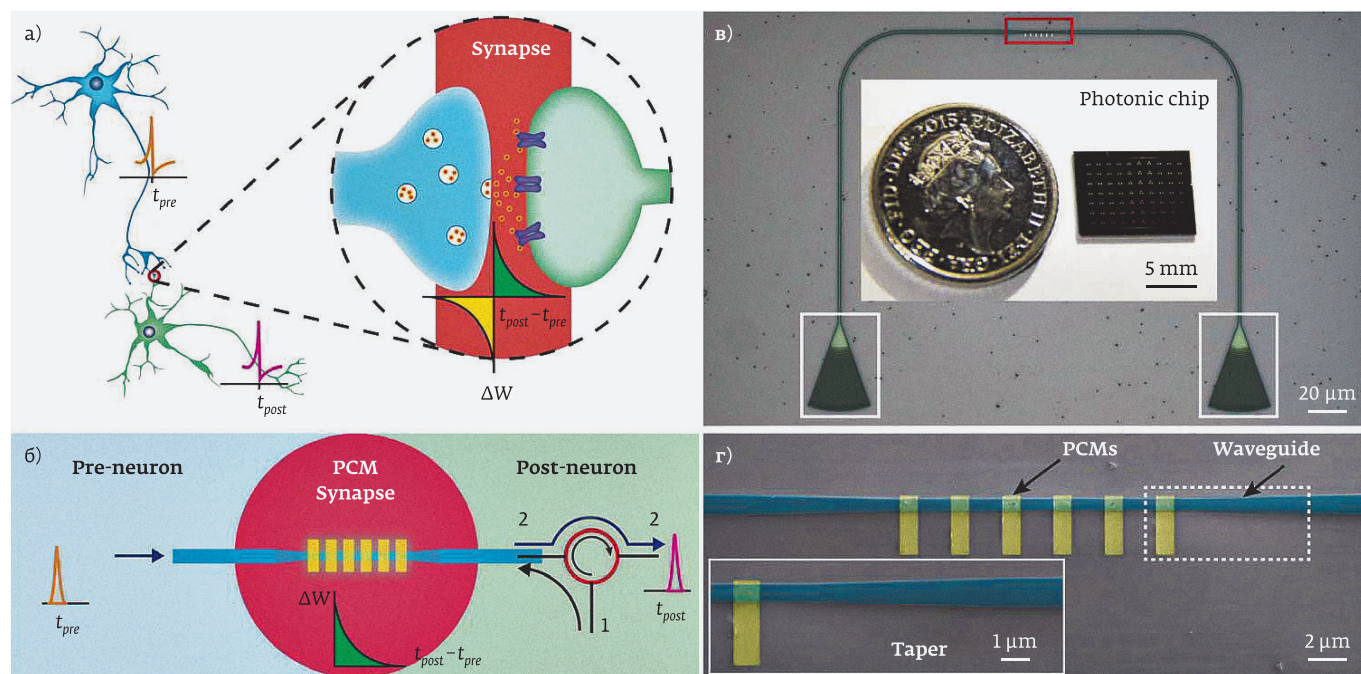


Рис. 17. Фотонный синапс на кристалле: а – структура нейрона и синапса (вставка: иллюстрация синапсового перехода); в – схема интегрального фотонного синапса, напоминающего функцию нейронного синапса. Синапс основан на конусообразном волноводе (темно-синий) с дискретными островами РСМ сверху, оптически соединяющий пресинаптические (преднейронные) и постсинаптические (постнейронные) сигналы. Красный открытый круг представляет собой циркулятор с портами 2 и 3, соединяющий синапс и постнейрон; взвешивающие импульсы подаются через порт 1 в синапс; в – изображение оптического микроскопа устройства с активной областью (красный прямоугольник) в качестве фотонного синапса. Оптический вход и выход устройства осуществляется через аподизированные дифракционные ответвители (белые прямоугольники) (вставка: типичный фотонный чип, содержащий 70 фотонных синапсов, имеет размер меньше, чем монета); г) изображение сканирующего электронного микроскопа активной области фотонного синапса, соответствующее красному прямоугольнику в (в) с шестью полосками GST (1 мкм × 3 мкм, желтый) на вершине волновода (синий цвет) (вставка: увеличенная коническая структура волновода, выделенная белой пунктирной рамкой) [19]

минимизировать рабочее напряжение устройства. Модуляция высоты барьера на границах наносфер во внешнем электрическом поле светом за счет переполяризации – высокоэффективный процесс для высокоскоростной обработки сигнала. Мемристор, поляризованный при 3 и 6 В, имеет четыре разные состояния, которые можно электрически считать оптическим возбуждением в виде четырех высокоомных состояний HRS и четырех низкоомных LRS. Следует отметить, что оптическая

и электрическая поляризация мемристора обеспечивает несколько нелинейных динамических процессов, которые позволяют строить систему с нейроморфной архитектурой.

ФОТОННЫЙ ЧИП С ФОТОННЫМИ СИНАПСАМИ

Фотонный чип, содержащий 70 фотонных синапсов, был продемонстрирован в сентябре 2017 группой из Окфорда, Мюнстера и Эксетера [19].

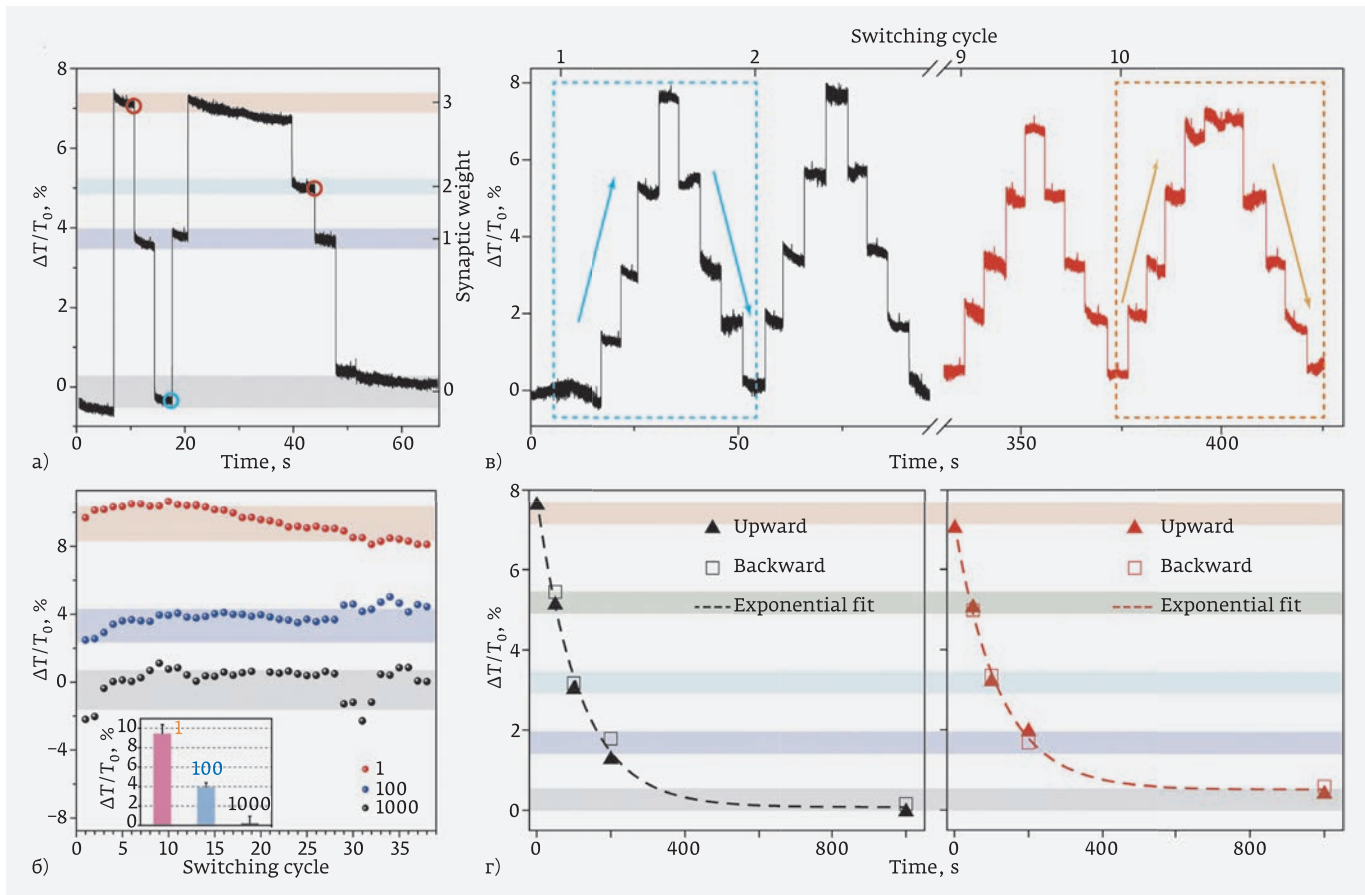


Рис. 18. Синаптический вес и пластичность: а – демонстрация дифференциального синаптического веса устройства на рис. 17 при переключении между кристаллическим и аморфным состояниями островков GST с зарегистрированным относительным изменением коэффициента ($\Delta T / T_0$). Каждый вес может быть достигнут с таким же количеством импульсов (50 нс при 243 пДж, 1 МГц) от любого предыдущего веса; б – повторяемость веса по нескольким циклам (вставка: статистический анализ изменения показаний для веса «0», «1» и «4»). Приложенный импульс был равен 50 пс при 320 пДж, немного больше, чем в (а); в – получено пять массфотонных синапсов при переключении энергией оптического импульса (404,5 пДж, 50 нс). Пунктирные синие (желтые) прямоугольники соответствуют первому (последнему) весовому циклу. Стрелки вверх и вниз в прямоугольниках – это направления взвешивания; г – фотонный синаптический вес ($\Delta T / T_0$) как функция числа оптических импульсов. Левая (правая) панель соответствует данным отмеченного синего (желтого) поля в (г). Закрашенные треугольники (незакрашенные квадраты) представляют собой данные из направленного вверх (вниз) направления взвешивания. Пунктирные линии представляют собой экспоненциальные кривые наиболее близкие к экспериментальным данным [19]

Запись, стирание и считывание информации в данном случае осуществляется полностью оптическими методами (рис. 17). Фотонный синапс состоит из конусообразного волновода (темно-синий) с дискретными островами фазоменяющего материала (далее РСМ) сверху, оптически соединяющего пре-синаптические (преднейронные) и постсинаптические (постнейронные) сигналы. Использование чисто оптических средств дает сверхбыструю ско-

рость работы, практически неограниченную полосу пропускания и отсутствие потерь электрической мощности на межсоединениях. Существенно, что синаптический вес может быть случайным образом установлен просто изменяя количество оптических импульсов, которые создают систему с непрерывно изменяющейся синаптической пластичностью, отражая истинную аналоговую природу биологических синапсов.

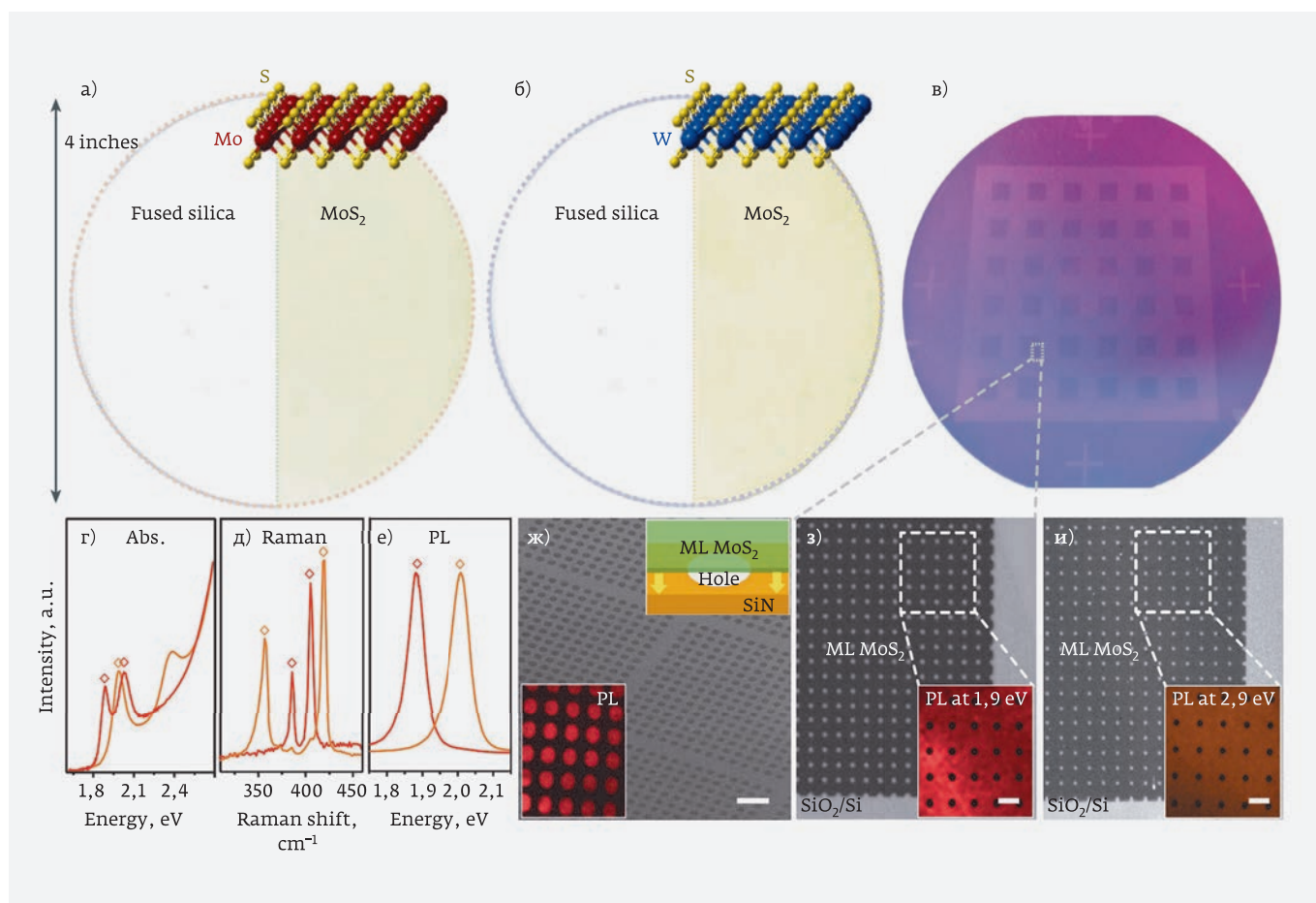


Рис. 19. Однослойные пленки TMD на 4-дюймовых пластинах. а, б – фотографии монослоев MoS₂ (а) и WS₂ (б) пленок, выращенных на 4-дюймовых подложках, с диаграммами их соответствующих атомных структур. Левые половины показывают подложку из кварца для сравнения. в – фотография узорчатой монослойной пленки MoS₂ на 4-дюймовой пластине SiO₂/Si (более темные участки покрыты MoS₂). г – спектры оптического поглощения MOCVD-выращенного монослоя MoS₂ (красная линия) и WS₂ (оранжевая линия) в диапазоне энергий фотонов от 1,6 до 2,7 эВ. д – спектры комбинационного рассеяния выращенного монослоя MoS₂ и WS₂, нормированные на интенсивность пика кремния. е – нормализованные спектры фотолюминесценции выращиваемых монослоев MoS₂ и WS₂. Положения пиков в г–е согласуются с положениями пиков, полученными из отслоенных образцов (алмазов). ж – изображение SEM и фотолюминесценция (PL) (нижняя вставка, при 1,9 эВ) монослойных (ML) MoS₂-мембран, подвешенных на сетке SiN TEM с отверстиями 2 мкм (схема подвесной пленки показана в верхней вставке). Метка, 10 мкм. з, и – оптические изображения (нормализованные к области чистой подложки) узорчатого монослоя MoS₂ (з) и WS₂ (и) на SiO₂, взятые из пленок с рисунком в масштабе пластины. На вставках представлены фотолюминесцентные изображения для энергий 1,9 эВ (з) и 2,0 эВ (и). Масштабная метка, 10 мкм [20]

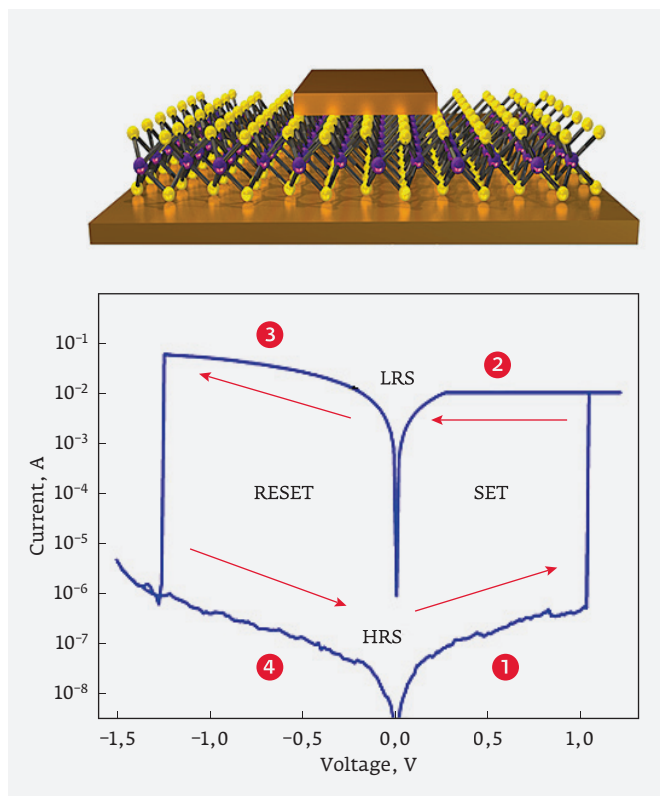


Рис. 20. Схема TMD сэндвича на основе MoS_2 , выращенного на Au-фольге (вверху) и репрезентативная кривая I–V поведения биполярного резистивного переключения в монослое MoS_2 с латеральной площадью $2 \times 2 \text{ мкм}^2$ (внизу). Шаг 1: напряжение увеличивается от 0 до 1,2 В. При ~ 1 В ток резко возрастает до тока ограничения, указывая на переход (SET) из состояния высокого сопротивления (HRS) в состояние низкого сопротивления (LRS). Шаг 2: напряжение уменьшается от 1,2 до 0 В. Устройство остается в LRS. Шаг 3: напряжение увеличивается от 0 до $-1,5$ В. При $-1,25$ В ток резко уменьшается, указывая на переход (RESET) от LRS до HRS. Шаг 4: напряжение уменьшается от $-1,5$ до 0 В. Устройство остается в режиме HRS до следующего цикла [21]

СИНАПТИЧЕСКИЙ ВЕС И ПЛАСТИЧНОСТЬ

Синаптическое подстраивание устройства при переключении между кристаллическим и аморфным состояниями островков GST с записанным изменением коэффициента относительного пропускания представлено на рис. 18.

Пять весовых состояний фотонного синапса получают переключением энергии оптического импульса ($404,5 \text{ пДж}$, 50 нс). Фотонный синапс демонстрирует хорошую воспроизводимость весовых

чисел при цикличности измерений (рис. 18б). При этом фотонный синаптический вес определяется числом оптических импульсов (рис. 18в).

2D TMD (MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 И WSe_2) ПАМЯТЬ

МОСVD рост полупроводниковых монослоевых пленок MoS_2 и дисульфида вольфрама (WS_2) на оксиде кремния при $500 \text{ }^\circ\text{C}$ на 4-дюймовой пластине (рис. 19) позволяет получить превосходные электрические характеристики и структуру для 2D-мемристоров [20].

АТОМРИСТОР: ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМАЯ АТОМАРНАЯ РЕЗИСТИВНАЯ TMD-ПАМЯТЬ

В декабре 2017 года Argonne National Laboratory продемонстрировала атомристор – энергонезависимую атомарную резистивную 2D TMD (MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 and WSe_2) память (рис. 20), которая масштабируется до субнанометра [21]. Новые концепции устройств в энергонезависимой гибкой памяти и мозгу-подобные (нейроморфные) вычисления могут существенно выиграть от колоссальных возможностей для проектирования 2D-материалов. Было продемонстрировано новое крупное приложение, статическое радиочастотное (RF) переключение с помощью монослоя MoS_2 , работающего на частоте 50 ГГц [21].

Учитывая глобальный интерес к многослойным атомным материалам [22], важно рассмотреть потенциальные приложения. Одной из новых целей является твердотельная память следующего поколения с фазовыми изменениями и устройствами ТМО, которые в настоящее время являются ведущими кандидатами за последнее десятилетие. Устройства атомристор обладают определенными преимуществами в плане предельного вертикального масштабирования вплоть до атомного слоя без формовочной операции. При замене металлических электродов на графен всю ячейку памяти можно масштабировать ниже 2 нм . Более того, прозрачность графена и уникальные спектроскопические особенности 2D-материалов позволяют прямую оптическую характеризацию для исследований *in situ* и тестирования на линейке изготовления. В настоящее время данные ручного тестирования стойкости прибора (рис. 21 а, б) еще недостаточны для удовлетворения строгих требований к твердотельной памяти и являются отражением зарождающегося состояния атомристоров по сравнению с ТМО мемристорами, которые имели аналогичную выносливость ($<10^3$ цикла) в ранних исследованиях, но

теперь продвинулись выше 10^6 циклов [23]. Насыщение кислородом с помощью интерфейсной инженерии или легирования может повысить стойкость прибора, аналогично тому, что наблюдалось для аморфно-углеродных запоминающих устройств [24]. Тест импульсного циклирования для практических применений является важным вопросом, который будет в центре внимания будущих исследований. Сохранение энергонезависимых состояний, протестированных до недели (рис. 21 в), уже достаточно для определенных нейроморфных применений, включающих короткую и среднесрочную пластичность [25]. Более того, субнанометровая толщина монослоев перспективна для реализации сверх-

высоких плотностей. При свободном шаге 10 нм плотность атомристора $10^{15}/\text{мм}^3$ обеспечивала бы достаточное пространство для имитации плотности синапсов человека ($\sim 10^9/\text{мм}^3$) [26]. Для однобитового одноуровневого запоминающего устройства это соответствует теоретической поверхностной плотности 6,4 Тбит/дюйм².

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ 2D MoS₂-АТОМРИСТОР

Энергонезависимые маломощные ВЧ-переключатели представляют собой еще одно применение атомристоров. Современные переключатели реализованы с помощью транзисторных или микроэлектромеха-

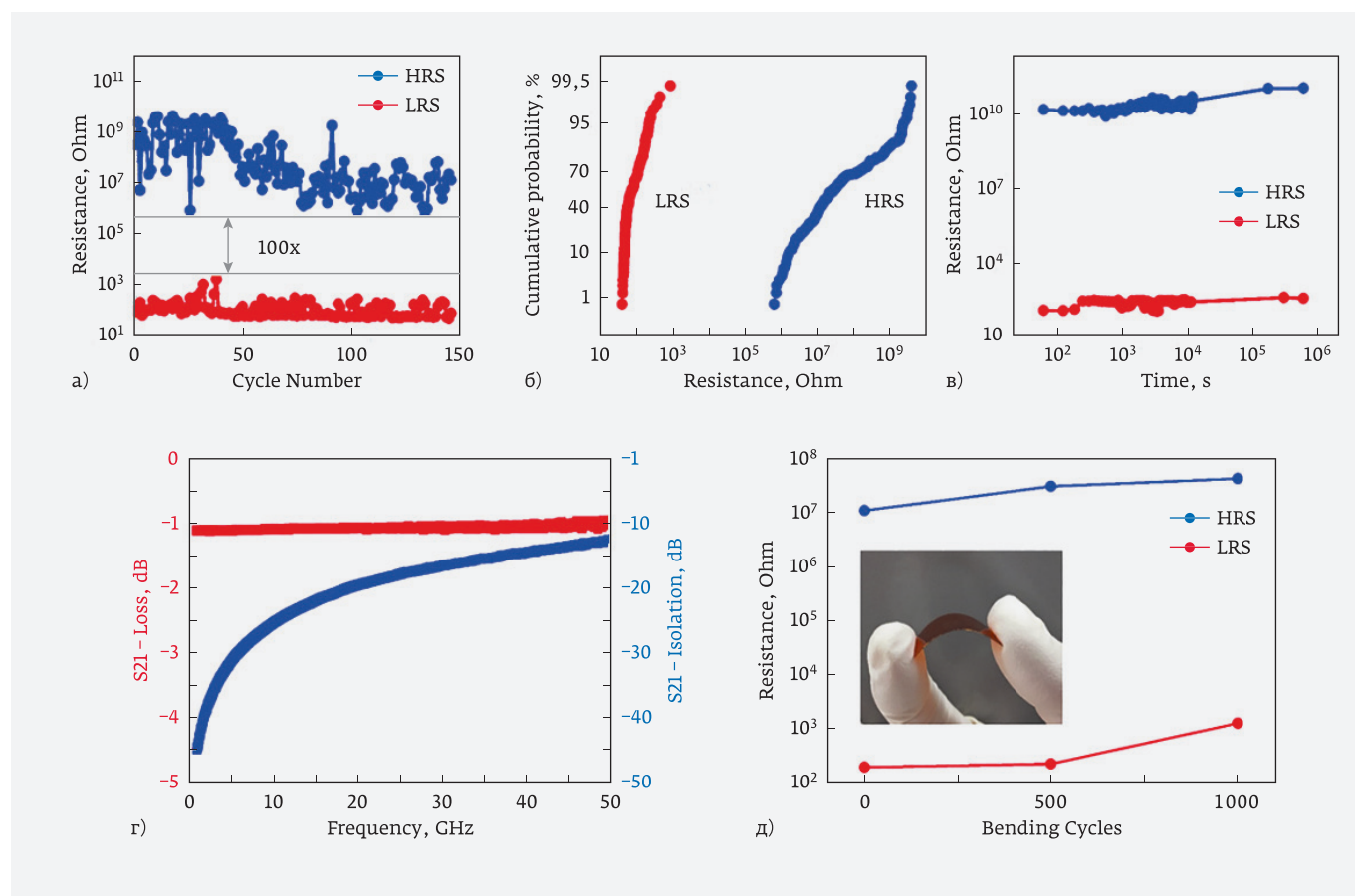


Рис. 21. Репрезентативная производительность атомристора. а, б – разброс сопротивления crossbar MoS₂ MIM-устройства для 150 ручных DC циклов переключения; в – зависимость от времени измерения поперечного переключателя MoS₂ с устойчивым хранением информации в течение недели при комнатной температуре. Сопротивление HRS и LRS определяется измерением тока при небольшом смещении 0,1 В. Площадь этого поперечного устройства 2L-MoS₂ составляет 2×2 мкм²; г – экспериментальные энергонезависимые ВЧ-переключатели на основе монослоя MoS₂ размером 1×1 мкм² показывают многообещающие характеристики с вносимыми потерями ~1 дБ и изоляции ~>12 дБ до 50 ГГц. Показатель частоты отсечки составляет ~1,8 ТГц; д – стабильная сопротивляемость высокоомного и низкоомного состояний сопротивления после 1000 циклов изгиба при 1% деформации [21]

нических устройств, оба из которых являются энергозависимыми, а последний требует также большого переключающего напряжения, что далеко неидеально для мобильных технологий. В последнее время интерес вызвали переключатели с изменением фаз [27], однако требования к высокотемпературной плавке фазы и большие времена переключения ограничили их использование. В этом свете, атомристоры предлагают беспрецедентное продвижение для высокочастотных систем из-за их работы с низким напряжением, малого форм-фактора, высокой скорости переключения и низкотемпературной интеграции, совместимой с Si или гибкими подложками. Исходные экспериментальные энергонезависимые ВЧ-переключатели показывают многообещающие результаты с приемлемыми вносимыми потерями ~ 1 дБ и выделением ~ 12 дБ до 50 ГГц (рис. 21г). Полученное сопротивление при включенном состоянии $R_{ON} \approx 11$ Ом, емкость при выключенном состоянии $C_{OFF} \approx 7,7$ фФ. Это приводит к показателю полезности (далее FOM) частоте отсечки, $f_{co} = 1/(2\pi R_{ON} C_{OFF}) \approx 1,8$ ТГц. FOM используется для оценки ВЧ-переключателей [27, 28]. Дальнейшие улучшения, особенно с точки зрения масштабирования, как ожидается, приведут к значительному увеличению FOM. Важно отметить, что уникальная комбинация независимой (приблизительно) от площади LRS сопротивления и зависящей от площади емкости HRS дает FOM, который можно масштабировать до 100 с THz за счет уменьшения площади устройства, определяющего преимущества по сравнению с переключателями с изменением фазы [27, 28], где емкость пропорциональна ширине, но R_{ON} обратно зависима, следовательно, предотвращает масштабирование частоты без существенных компромиссных потерь. Кроме того, высокое напряжение механического разрыва и простота интеграции 2D-материалов на мягкие подложки позволяют производить гибкие энергонезависимые цифровые и аналоговые/RF-переключатели, способные выдерживать механическое циклирование (рис. 21д).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мемристивные системы на основе 2D-кристаллов – новый класс энергонезависимых электронных компонентов, способный решить проблему масштабирования. Самоорганизованные синапсо-подобные мемристивные системы, управляемые переходами между sp^3 - sp^2 -конфигурациями углерода в электрическом поле, могут быть применены в искусственных нейронных сетях и интеллектуальных маши-

нах. Переключение энергонезависимого сопротивления в атомарной однослойной TMD (MoS_2 , $MoSe_2$, WS_2 , WSe_2) памяти обусловлено природой, присущей слоистой кристалличности, которая создает четкие интерфейсы и чистые туннельные барьеры, что предотвращает чрезмерную утечку и создает устойчивые состояния. 2D-память может быть использована как для существующих уже приложений в области памяти / вычислений, так и в новых приложениях для радиочастотного переключения со сверхмалым потреблением энергии. 2D-фотомемристоры с плавающим фотозатвором демонстрируют множественные состояния, управляемые в широком диапазоне электромагнитного излучения, и могут найти применение для широкого круга задач, связанных с нейроморфными вычислениями, обработкой изображений и распознаванием образов звуков, движений, речи, необходимых для создания искусственного интеллекта.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

Работа выполнена в рамках Государственного Задания № 007-00220-18-00

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chua L. O.** Memristor – the missing circuit element. IEEE Trans. Circuit Theory 18, 507–519 (1971).
2. **Bardeen J.** Three-Electrode Circuit Element Utilizing Semiconductive Materials, US. Patent No. 2,524,033, filed Feb. 26, 1948, issued Oct. 3, 1950.
3. **Bardeen J. and Brattain W. H.** Physical Principles Involved in Transistor Action, Phys. Rev., 75, 1208–1225 (1949).
4. **Bardeen J.** Semiconductor Research Leading to The Point Contact Transistor, Nobel Lecture, Dec. 11, 1956, Science, 126, 105–112 (1957).
5. **Shockley W.** Semiconductor Amplifier Patent, U. S. Patent No. 2,569,347, filed June 26, 1948, issued Sept., 25, 1951.
6. **Bardeen J. and Brattain W. H.** The Transistor // A Semiconductor Triode // Phys. Rev. 74. 230–231 (1948).
7. **Brattain W. H. and Bardeen J.** Nature of The Forward Current in Germanium Point Contacts // Phys. Rev., 74, 231–232 (1948).
8. **Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R. & Williams R. S.** The missing memristor found // Nature (2008) 453. 80–83.

9. **Novoselov K. S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A. A.** Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // *Science* V 306. Issue 5696. 666–669 (2004).
10. **Panin G.N., Kapitanova O. et al.** Int. Symp. Graphene Devices (2010) Sendai, Japan.
11. **Panin G. N., Kapitanova O.O., Lee S.W., Baranov A.N. and Kang T.W.** Japanese Journal of Applied Physics. 2011. 50. 070110.
12. **Kapitanova O. O., Panin G.N., Baranov A.N. and Kang T.W.** Journal of the Korean Physical Society, 2012. 60. 1789–1793.
13. **Kapitanova O. O., Panin G.N., Kononenko O. V., Baranov A.N. and Kang T.W.** Journal of the Korean Physical Society. 2014. 64. 1399–1402.
14. **Капитанова О. О.** Наноструктуры с резистивным переключением на основе оксида графена // PhD Thesis. МГУ. 2015.
15. **Kapitanova O. O., Panin G.N., Cho H.D., Baranov A.N. and Kang T.W.** Nanotechnology. 2017. 28. 204005.
16. **Goldsmith B.R., Coroneus J.G., Khalap V.R., Kane A.A., Weiss G.A., Collins P.G.** Conductance-Controlled Point Functionalization of Single-Walled Carbon Nanotubes // *Science*. 2007. 315. 77.
17. **Nagareddy V. K., Barnes M.D., Zipoli F., Lai K. T., Alexeev A.M., Craciun M.F., Wright C.D.** Multilevel Ultrafast Flexible Nanoscale Nonvolatile Hybrid Graphene Oxide–Titanium Oxide Memories, *ACS Nano*, 2017, 11 (3), pp. 3010–3021, DOI: 10.1021/acsnano.6b08668.
18. **Wang W., Panin G.N., Fu Xiao, Zhang Lei, Ilanchezhian P., Vasily Pelenovich O., Fu Dejun & Tae Won Kang** MoS₂ memristor with photoresistive switching, *Scientific Reports* V6, Article number: 31224 (2016), doi:10.1038/srep31224
19. **Chen Z., Ríos C., Pernice W.H.P., Wright C.D. and Bhaskaran H.** On-chip photonic synapse // *Science Advances*. 2017. Vol. 3. No. 9. e1700160, DOI: 10.1126/sciadv.1700160.
20. **Kang K., Xie S., Huang L., Han Y., Huang P.Y., Mak Kin Fai, Kim Cheol-Joo, Muller D. & Jiwoong.** Park High-mobility three-atom-thick semiconducting films with wafer-scale homogeneity // *Nature*. 2015. 520. 656–660. doi:10.1038/nature14417.
21. **Ge Ruijing, Wu Xiaohan, Kim Myungsoo, Shi Jianping, Sonde Sushant, Tao Li, Zhang Yanfeng, Lee J.C., Akinwande Deji.** Atomristor: Nonvolatile Resistance Switching in Atomic Sheets of Transition Metal Dichalcogenides // *Nano Lett.* 2018. 18 (1). pp. 434–441, DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b04342.
22. **Akinwande D., Petrone N., Hone J.** *Nat. Commun.* 2014. 5. 5678.
23. **Wong H.-S. P., Lee H.-Y., Yu S., Chen Y.-S., Wu Y., Chen P.-S., Lee B., Chen F. T., Tsai M.-J.** *Proc. IEEE*2012. 100 (6). 1951–1970.
24. **Santini C. A., Sebastian A., Marchiori C., Jonnalagadda V. P., Dellmann L., Koelmans W.W., Rossell M.D., Rossel C.P.** Eleftheriou, E. *Nat. Commun.* 2015. 6. 8600.
25. **Indiveri G., Liu S.C.** *Proc. IEEE*2015, 103 (8), 1379–1397.
26. **Yu S., Kuzum D., Wong H.S. P.** Design considerations of synaptic device for neuromorphic computing, 2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS); IEEE, June 1–5, 2014. PP. 1062–1065.
27. **Wang M., Rais-Zadeh M.J.** *Micromech. Microeng.* 2017. 27 (1). 013001.
28. **Moon J. S., Hwa-Chang S., Le D., Helen F., Schmitz A., Oh T., Kim S., Kyung-Ah S., Zehnder D., Baohua Y.** 11 THz figure-of-merit phase-change RF switches for reconfigurable wireless front-ends. 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium; IEEE, May 17–22, 2015. PP. 1–4.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ САМОСОВМЕЩЕННОГО ПАТТЕРНИРОВАНИЯ В ИММЕРСИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ

► Г. Я. Красников, О. П. Гущин, М. В. Литаврин, Е. С. Горнев
АО «НИИМЭ»

Мультимпаттернирование позволило продолжить масштабирование технологии чипов до нормы 28 нм и далее. Самосовмещенное двойное паттернирование (SADP) и самосовмещенное четырехкратное паттернирование (SAQP), а также итерации Litho-Etch / Litho-Etch (LELE) широко используются в полупроводниковой индустрии, так как это позволяет формировать структуры с суб-193i-литографическими размерами для таких слоев, как FIN, затворы и критические слои металлизации [1]. Однако при мультимпаттернировании увеличивается сложность маршрута, а также возрастают случайные ошибки положения края, зависящие в том числе от точности совмещения.

В статье рассматриваются методы мультимпаттернирования для формирования линий и контактных окон, их преимущества и недостатки, а также способы уменьшения ошибок положения края, в том числе за счет применения самосовмещенных методов.

SOME ASPECTS OF SELF-ALIGNED MULTIPATTERNING IN IMMERSION LITHOGRAPHY

G. Ya. Krasnikov, O. P. Gushchin, M. V. Litavrin, E. S. Gornev

MERISC

Multipatterning has enabled continued scaling of chip technology at the 28 nm node and beyond. Self-aligned double patterning (SADP) and self-aligned quadruple patterning (SAQP) as well as LithoEtch / Litho-Etch (LELE) iterations are widely used in the semiconductor industry to enable patterning at sub 193 immersion lithography resolutions for layers such as FIN, Gate and critical Metal lines [1]. However, multipatterning increases process complexity as well as EPE variations, which depend on overlay including.

In this paper we review multipatterning methods for line/space and contact holes formation, their advantages and disadvantages and also ways to decrease EPE variation, self-aligned techniques including.

ВВЕДЕНИЕ

Разрешение (полушаг, $P/2$), которое в оптической литографии определяется критерием Релея (1), можно улучшить за счет уменьшения длины волны экспонирующего излучения λ или увеличения числовой апертуры линзы NA (эволюции этих параметров, являющихся основными характеристиками сканера, показаны на рис. 1а и б), а также за счет понижения технологического

коэффициента k_1 , который характеризует технологию в целом [2].

$$\frac{P}{2} = k_1 \frac{\lambda}{NA}. \quad (1)$$

Увеличение NA до величины 1,35 и уменьшение λ до 193 нм реализованы в ArFi иммерсионных сканерах производителей ASML и Nikon,

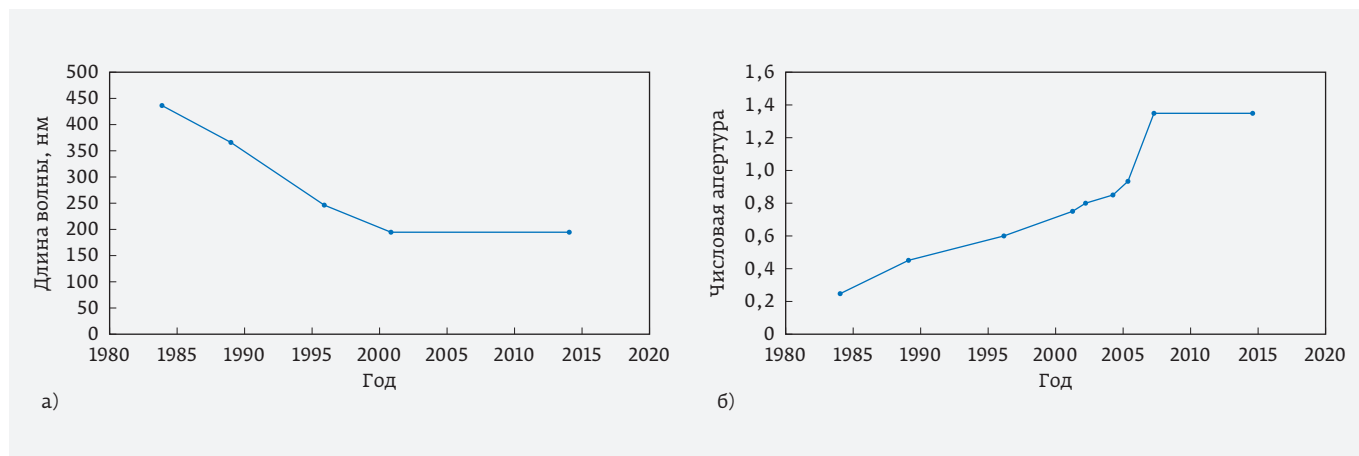


Рис. 1. Эволюция длины волны излучения и апертуры объектива оптических сканеров [2]

позволив достичь аппаратного разрешения 38 нм. Последующее же масштабирование до технологических норм 32–28–22–16 нм и ниже достигается за счет резкого снижения коэффициента k_1 посредством мультипаттернирования (multiple patterning, MP).

МУЛЬТИПАТТЕРНИРОВАНИЕ

Прежде чем перейти к рассмотрению особенностей маршрутов и технологий мультипаттернирования, рассмотрим подробнее несколько понятий. Прежде всего, необходимо уточнить что «технологическая норма» и «минимальный размер» – это разные понятия. Первоначально термин «технологическая норма» в КМОП-проекте

характеризовал длину затвора, и это действительно являлось минимальным размером примерно до нормы 0,5 мкм. Далее, ITRS определял технологическую норму как полушаг линий M1 (первый уровень металлизации), однако ко времени перехода на технологию FinFET (норма 22 нм и далее) это значение также утратилось. Нормы 22 нм и ниже не привязаны ни к какому топологическому размеру, и под одной и той же нормой разные производители могут подразумевать разные размеры транзисторов (см. табл. 1) [3].

На рис. 2 приведен типовой маршрут двойного паттернирования (Litho-Etch-Litho-Etch, LELE): литографией формируется рисунок в фоторезисте, этот рисунок передается травлением в слой

Таблица 1. Параметры нормы 14 нм у разных производителей интегральных микросхем [3]

		Intel	Samsung	GlobalFoundries
Название маршрута		P1272 (CPU) / P1273 (SoC)	14LPE, 14LPP, 14LPC, 14LPU	14NP
fin	Шаг	42	48	42
	Ширина	8	8	10
	Высота	42	~38	25
Длина затвора		20	30	18–26
Шаг контактов к затвору		70	78	80
Минимальный шаг металлизации		52	64	64

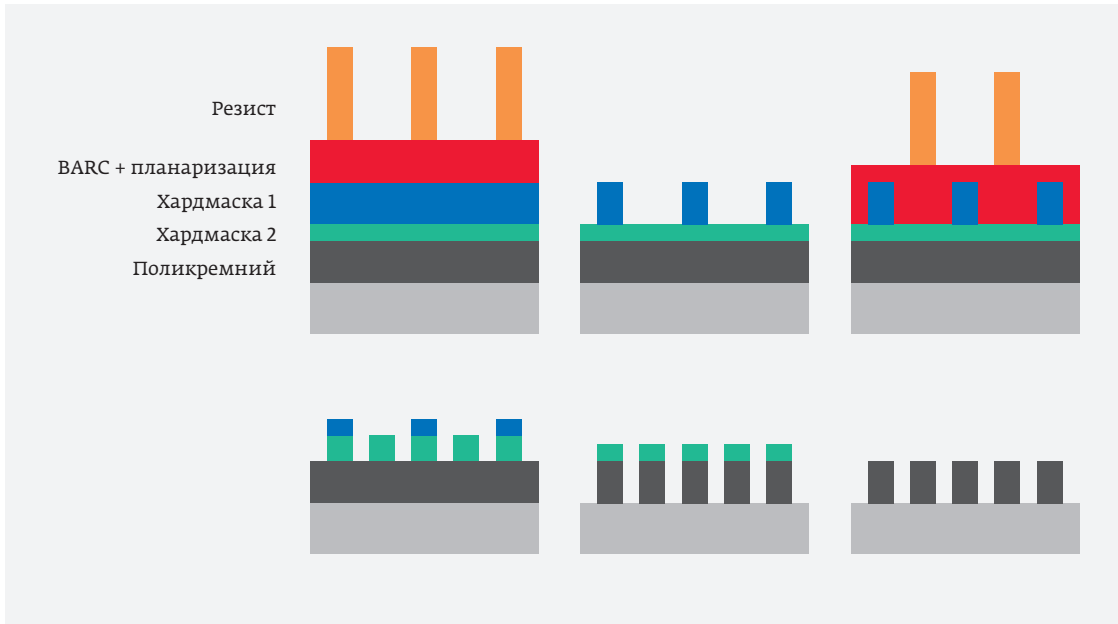


Рис. 2. Схема двойного паттернирования

первой жесткой маски, затем, после планаризации, проводится вторая литография с последующей передачей рисунка во вторую жесткую маску. Далее оба рисунка переносятся в нижележащие слои. Таким образом, сформирована регулярная структура с более высоким разрешением, чем можно получить с помощью одиночной литографии (сформировать литографией плотные линии гораздо сложнее, чем изолированные).

Отдельно следует отметить, что резист должен наноситься на планарную поверхность, поскольку

любая неровность вызовет смещение фокуса, что приведет к резкому возрастанию LER (Line Edge Roughness, неровность края линии). Именно в планаризации (выравнивании) поверхности и состоит функция планаризирующего слоя.

Возможно использование слоя, выполняющего функции одновременно и планаризирующего, и антиотражающего покрытия, BARC. Однако понятно, что свойства этого альтернативного варианта будут хуже, чем двух специализированных слоев. Поэтому используют трехслойный

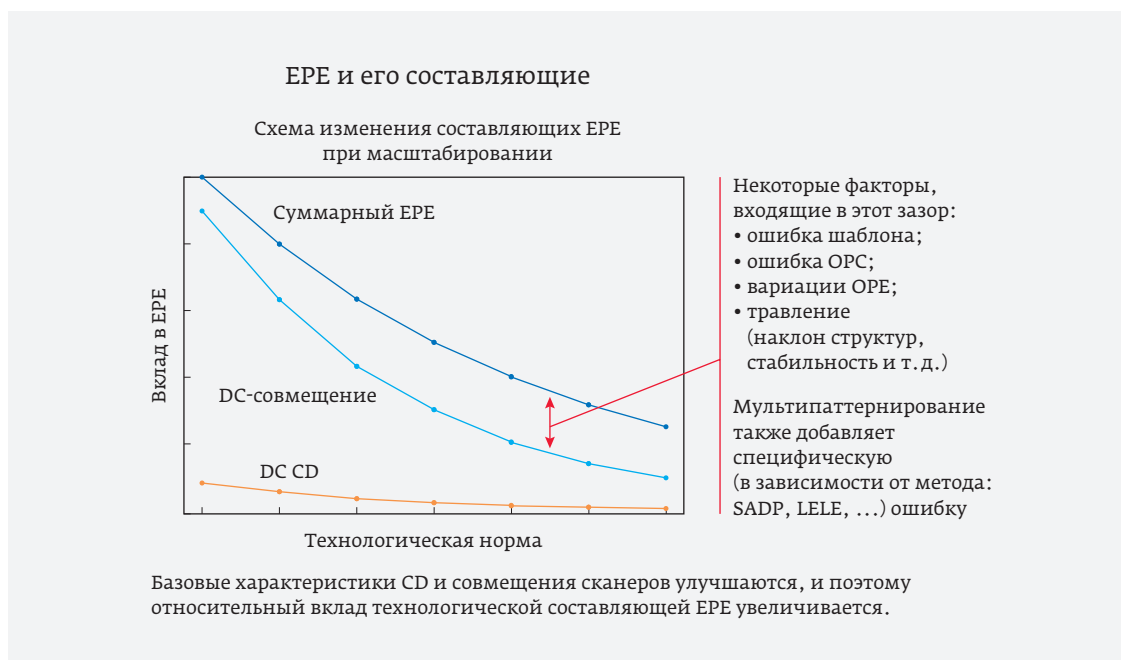


Рис. 3. Суммарный ЕРЕ, определяемый ошибками совмещения, CD и технологии – наибольшая техническая трудность для масштабирования, и необходимо уменьшить вклады в ЕРЕ на протяжении всех этапов процесса [5]

литографический стек резист/BARC/планарирующий слой [4]. После проведения литографии литографический стек в большинстве случаев удаляется.

ОШИБКА ПОЛОЖЕНИЯ КРАЯ

Ключевым фактором, ограничивающим масштабирование, является величина EPE (Edge Placement Error, ошибка положения края). Эта величина вводится для передовых технологических норм, и она характеризует всевозможные отклонения структуры от ее идеальных размера, положения и формы, то есть параметр EPE учитывает ошибки совмещения, неоднородность CD, LER/LWR, а также оборудование и технологию получения этой структуры.

Над устранением погрешностей, вносимых сканерами и фотомасками активно работают компании ASML и Nikon, ведущие мировые производители сканеров для полупроводниковой индустрии. Их последние модели иммерсионных сканеров, Twinscan NXT:1980Di и NSR-S631E, демонстрируют аномально высокие параметры совмещения для выполнения требований проектной нормы 7 нм. Важность параметров сканеров и значительный

прогресс в них подчеркнул на LithoVision в начале 2017 года д-р Марк Филлипс, ведущий специалист Intel и директор литографического направления, так как улучшение точности совмещения и глубины фокуса сканера 193i является важной частью сокращения EPE. Он сообщил об улучшении одиночного совмещения (Single Machine Overlay, SMO) модели NSR-S631E, а также о прогрессе в уменьшении других погрешностей, вносимых сканером [5].

Сокращение «DC» означает «dedicated chuck» – название режима, при котором для совмещения в системе с двумя столами у сканера ASML или Nikon используется только один из них. В обычном режиме на первом столе (p-chuck) проводится совмещение с метками пластины, а на втором (e-chuck) – совмещение с метками слоя (а в это время на первый стол уже поступает новая пластина и проводится ее позиционирование). За счет этого достигается более высокая производительность, но при передаче с одного стола на другой все же возникает небольшая ошибка совмещения. Чтобы ее избежать используют режим DC, в котором оба эти совмещения проводятся на одном и том же столе – более точный режим, но со сниженной производительностью.

Из рис. 3 очевиден громадный прогресс в уменьшении ошибок точности совмещения. Этот прогресс достигнут за счет упомянутых аппаратных улучшений, но также и за счет предпочтительного применения самосовмещенных методов, в том числе самосовмещенного мультипаттернирования – при таком типе мультипаттернирования отсутствует ошибка совмещения между литографиями, которая, например, присутствует в случае применения метода LELE (рис. 4).

САМОСОВМЕЩЕННОЕ МУЛЬТИПАТТЕРНИРОВАНИЕ (SADP / SAQP)

Для формирования критических слоев, чья структура близка к массиву параллельных линий (затворы, FIN и нижние уровни металлизации – M1 и M2), применяются самосовмещенные подходы: самосовмещенное двойное/четырёхкратное паттернирование (self-aligned double/quadruple patterning, SADP/SAQP). При этом отсутствует ошибка совмещения между разными составляющими структуры.

Этапы формирования массива параллельных линий методом SADP изображены на рис. 5а. Литографией формируются начальные линии (мен-

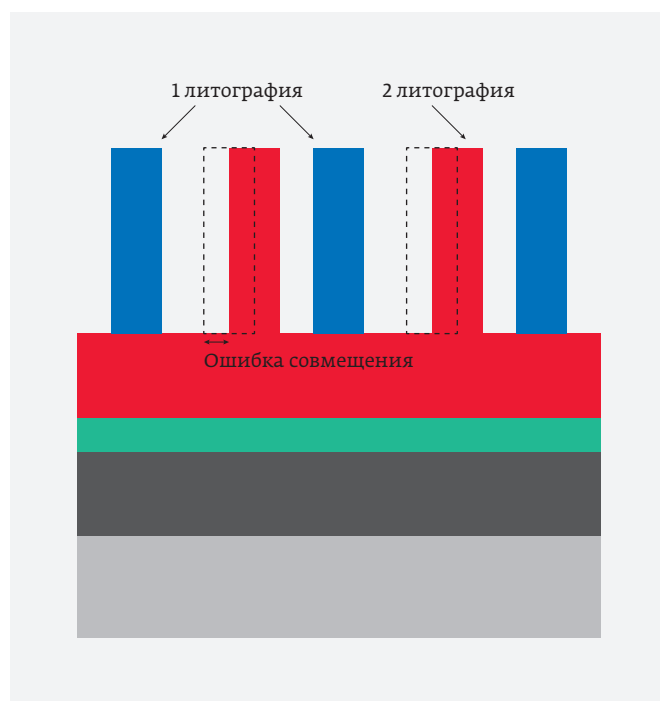


Рис. 4. Ошибка совмещения в методе LELE при последовательных литографиях между желаемым (пунктир) и реальным (красный) положениями второй структуры

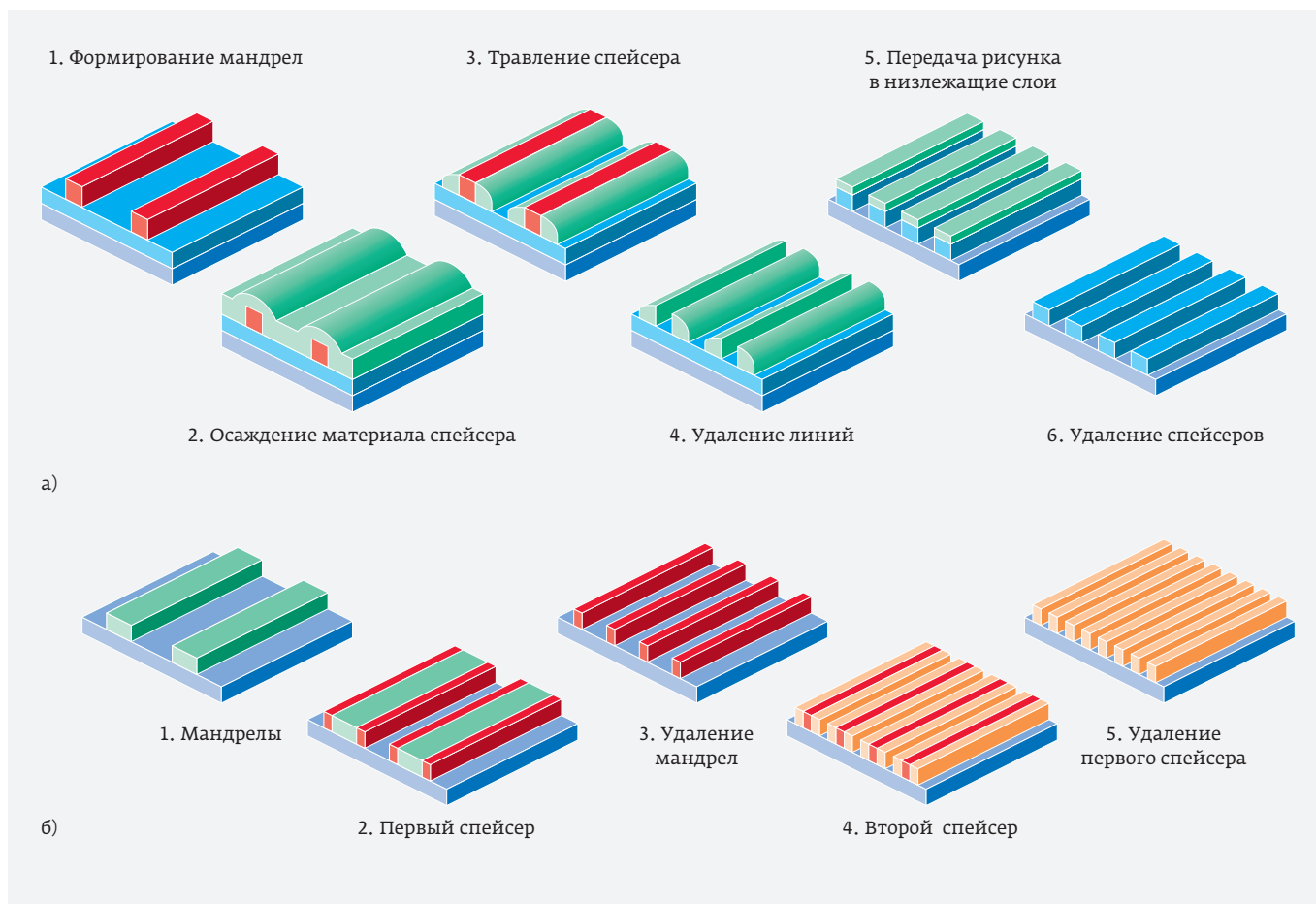


Рис. 5. SADP (а) и SAQP (б) [6]

дрелы) с определенным шагом (рис. 5а.1), затем осаждается материал спейсера – диэлектрик, как правило, SiO₂ (рис. 5а.2), проводится его травление до вскрытия линий-мендрел (рис. 5а.3), которые селективно вытравливаются на следующем этапе (рис. 5а.4). Полученный рисунок передается в слой low-k межуровневого диэлектрика (рис. 5а.5-6) – улучшение разрешения достигнуто. Данный способ позволяет получить линии с лучшим разрешением до двух раз (т. е. с размерами до 20 нм). Если этого недостаточно, то после этапа 4 (рис. 5а.4) можно повторить шаги 2-4 (рис. 5а.2-4) (разумеется, осаждаются будет уже другой диэлектрик) – это уже будет SAQP (рис. 5б). В этом случае шаг первоначальных линий-мендрел будет другим.

ПОДРЕЗАНИЕ / БЛОКИРОВАНИЕ

Реальная топология линий металлизации отличается от массива линий, который можно сформировать SADP/SAQP. Поэтому для металлизации после SADP/SAQP необходимо провести дополнительный

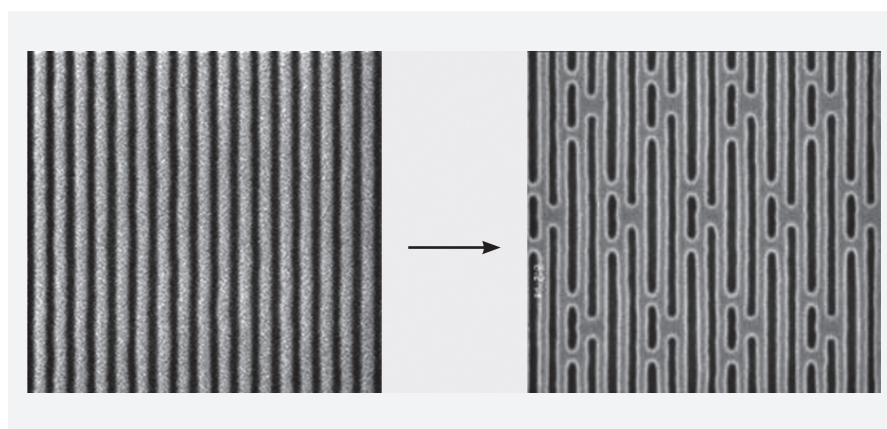


Рис. 6. «До» (слева) и «после» (справа) процесса [1]

процесс. В этом процессе происходит преобразование линий в конечную структуру (например рис. 6). В рассматриваемой вариации SADP/SAQP рисунок линий и перемычек между ними (показан светло-серым цветом на рис. 6б) передается в low-k-диэлектрик, и затем сформированные траншеи в слое low-k (темно-серый цвет) заполняются металлом (медью).

Существуют два метода проведения этого процесса: блокирование (blocking) и подрезание (cutting).

Блокирование

Метод блокирования предполагает точное совпадение желаемого рис. 7.1 с рисунком в low-k (рис. 7.7) (т.е. никаких лишних структур в low-k не будет). В этом случае на этапе формирования линий (рис. 7.2-4) их длина и положение определяются топологией. Далее при помощи маски для травления из этих линий и блок-маски (рис. 7.5) формируется рисунок в low-k (рис. 7.7). Недостатком этого метода является то, что для структур, более сложных, чем (рис. 7.1),

Процесс металлизации SADP

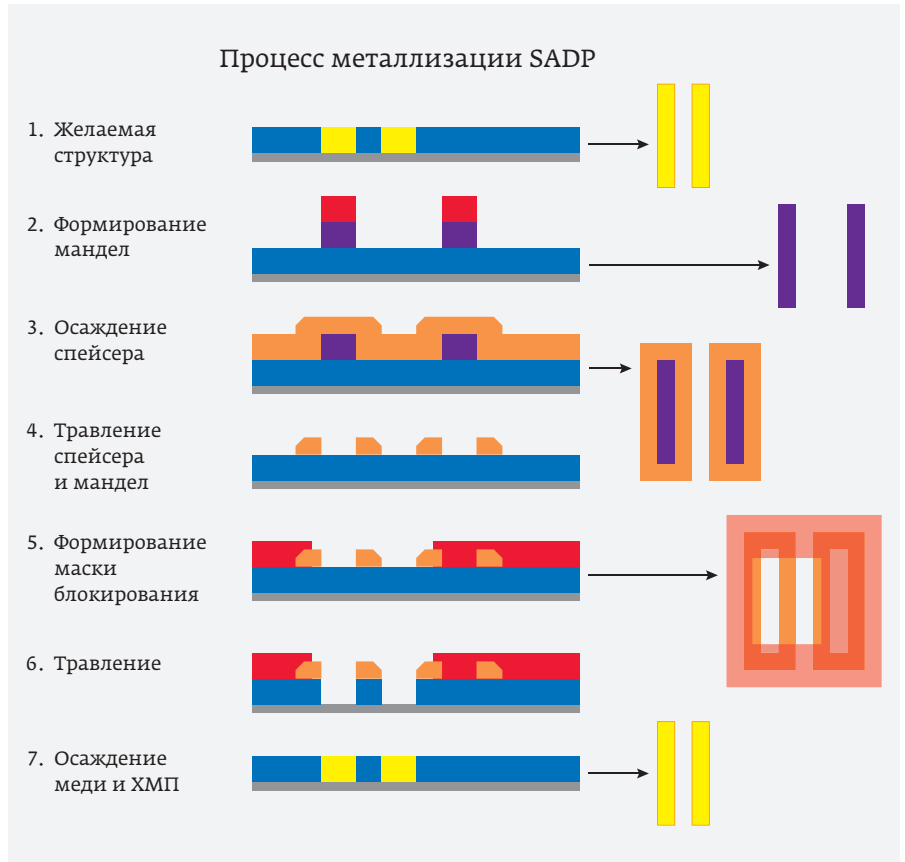


Рис. 7. Блокирование [7]

блок-фотомаска (рис. 7.5) достаточно сложная, из-за чего метод является затратным [6, 7].

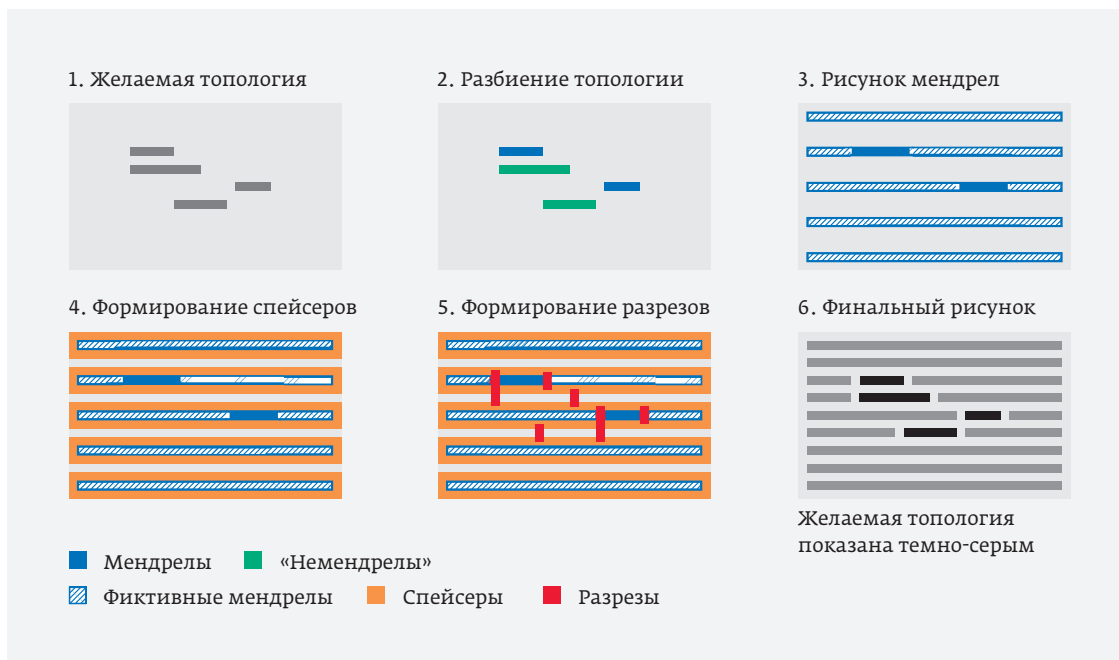


Рис. 8. Процесс подрезания [7]

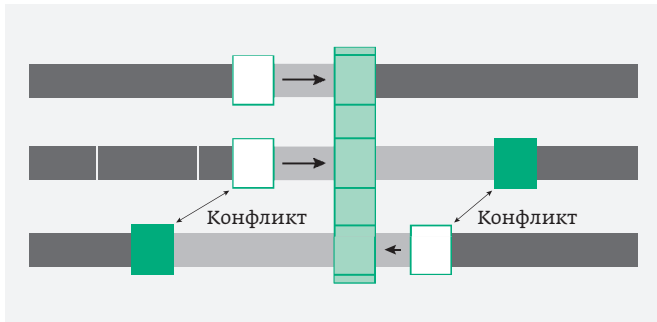


Рис. 9. Слияние разрезов на соседних линиях [8]

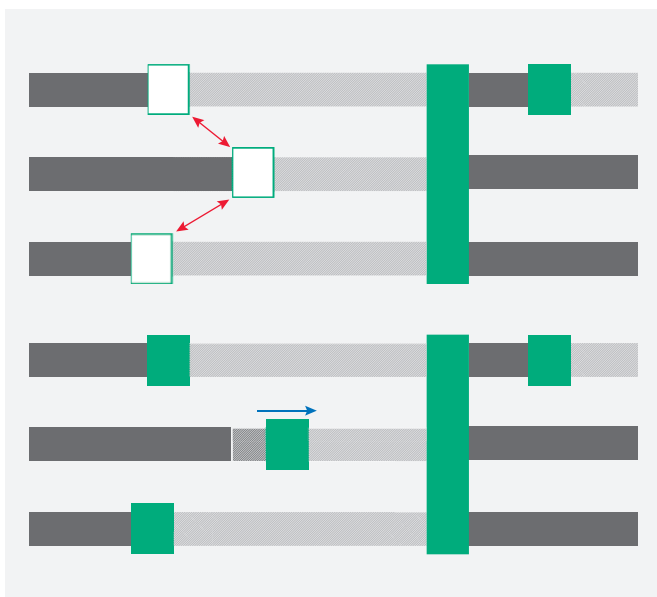


Рис. 10. Пример скользящих разрезов [8]

Подрезание

Метод подрезания позволяет избежать указанного недостатка, правда, получаемый рис. 8.6 не будет в точности совпадать с желаемым (рис. 8.1). На этапе формирования линии делаются длинными, до границ области (рис. 8.3-4, рис. 5б). Фотомаска для этапа подрезания будет сильно отличаться от уже рассмотренного метода блокирования. В нее входят только простые прямоугольники, сформировать которые литографией значительно проще, чем сложную блок-маску. В результате, рисунок в low-k (рис. 8.6) будет включать не только желаемые структуры (темно-серый цвет), но и фиктивные линии (светло-серый цвет) – эти линии топологией не предусмотрены, то есть являются «лишними». Но фактически топология останется той же самой, поскольку фиктивные линии электрически ни с чем не соединены [6, 7].

Этот метод дешевле с точки зрения массового производства и позволяет достичь лучшего разрешения ввиду того, что рисунок такой фотомаски литографически более прост, чем рисунок фотомаски для блокирования, однако фиктивные линии вносят дополнительную емкость. Но, так как расстояния между линиями невелики, эта емкость также будет небольшой.

Основная задача заключается в соблюдении правил, наложенных на маску подрезания, а именно соблюдение минимального расстояния между разрезами (иначе рисунок будет критически искажен вследствие эффекта дифракции). Слияние нескольких разрезов с разных «дорожек» в один – это простой способ избежать ограничения расстояния между небольшими разрезами. В этих случаях можно перемещать разрезы вдоль линий для обеспечения совмещения и облегчения слияния, как показано на рис. 9. Этот метод называется методом скользящих разрезов [7, 8].

Очевидным побочным эффектом скользящих разрезов является то, что конечная целевая линия на пластине будет длиннее, чем планировалось изначально, что увеличивает емкость структуры. Важно охарактеризовать изменение паразитных емкостей из-за скользящих разрезов, хотя воздействие обычно незначительно.

Пример применения этого метода показан на рис. 10. Между разрезом на центральной линии и его двумя соседями есть конфликт взаимного

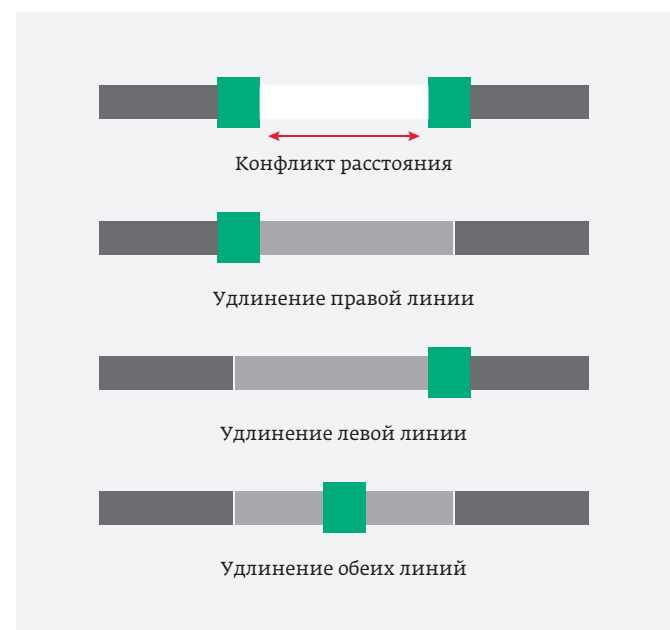


Рис. 11. Слияние разрезов на одной линии [8]

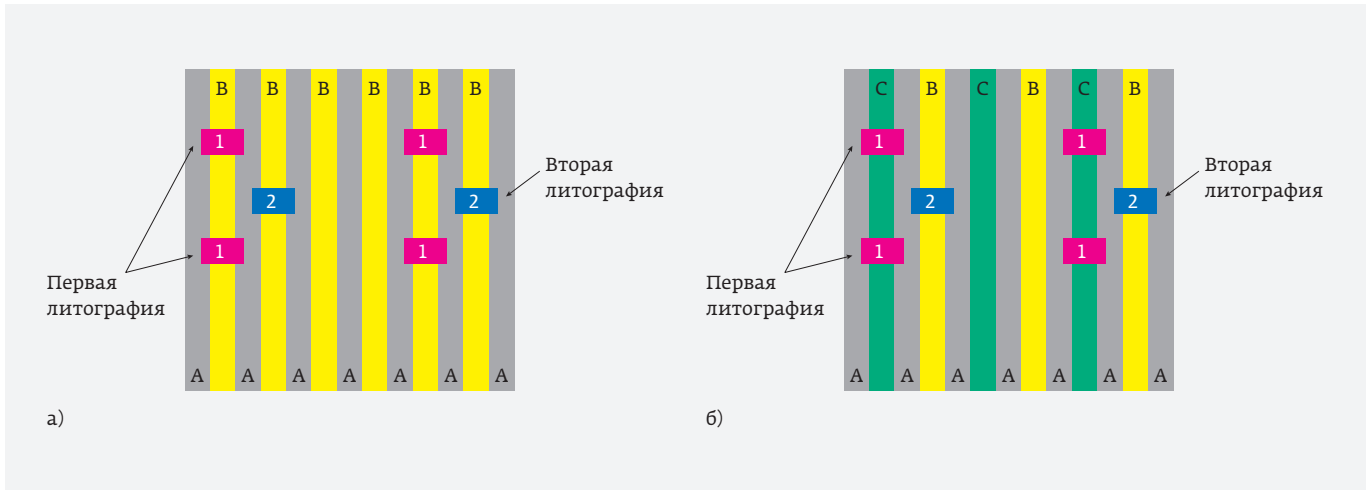


Рис. 12. Метод многоцветного травления

влияния. Этот разрез можно сдвинуть вправо, чтобы устранить это нарушение, но до тех пор, пока не появится новое нарушение расстояния с длинным разрезом справа.

Иногда топология требует провести два слишком близких разреза одной линии (рис. 11). В этом случае можно слить эти разрезы в один, лежащий между их начальным положением.

Различные комбинации сдвига и слияния разрезов могут использоваться для соответствия различным правилам маски подрезания, таким как ограничения расстояния между разрезами и максимально допустимая длина разреза. Тем не менее, дизайнеры должны знать, что использование любого из этих решений накладывает дополнительную сложность на создание маски подрезания и, как следствие, повышает ее стоимость.

У проблемы слишком близких разрезов есть и другое решение. Можно разложить фотомаску разрезов на две (или более) фотомаски, то есть

вместо одиночной литографии воспользоваться методом LELE. Это позволит повысить плотность упаковки структур и уменьшить их размер, но нужно учитывать наличие ошибки совмещения между литографиями.

При дальнейшем масштабировании можно будет совместить методы скользящих разрезов и LELE.

Стоимость фотомаски для метода подрезания, хотя она и ниже, чем для фотомаски блокирования, все равно довольно высока – для технологической нормы 7 нм она составляет ~300 000 [6], а число фотомасок для данной нормы может достигать ~60. Потенциально экономически выгодным решением для производств с небольшими объемами является дополнение иммерсионной литографии на критических слоях комбинированным методом прямой записи многолучевой электронной литографии, если основному разработчику оборудования для этого метода, гол-

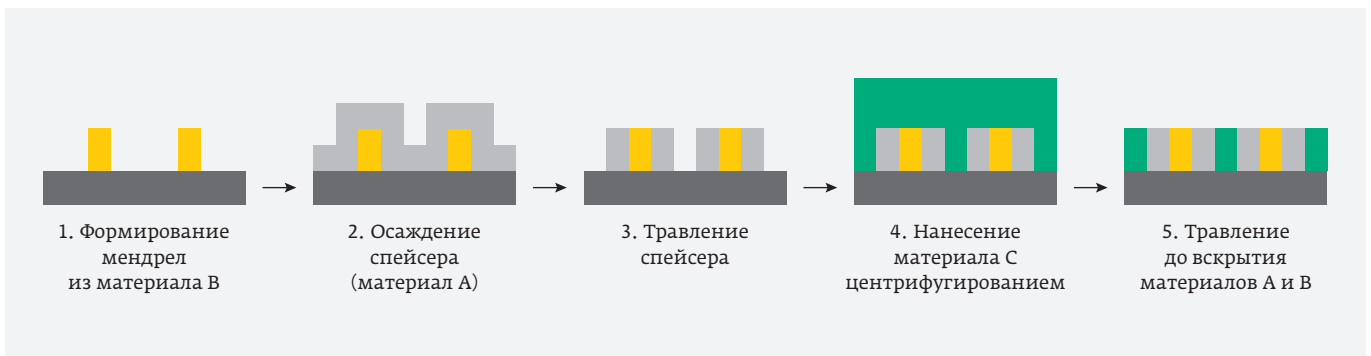


Рис. 13. Пример формирования многоцветных линий

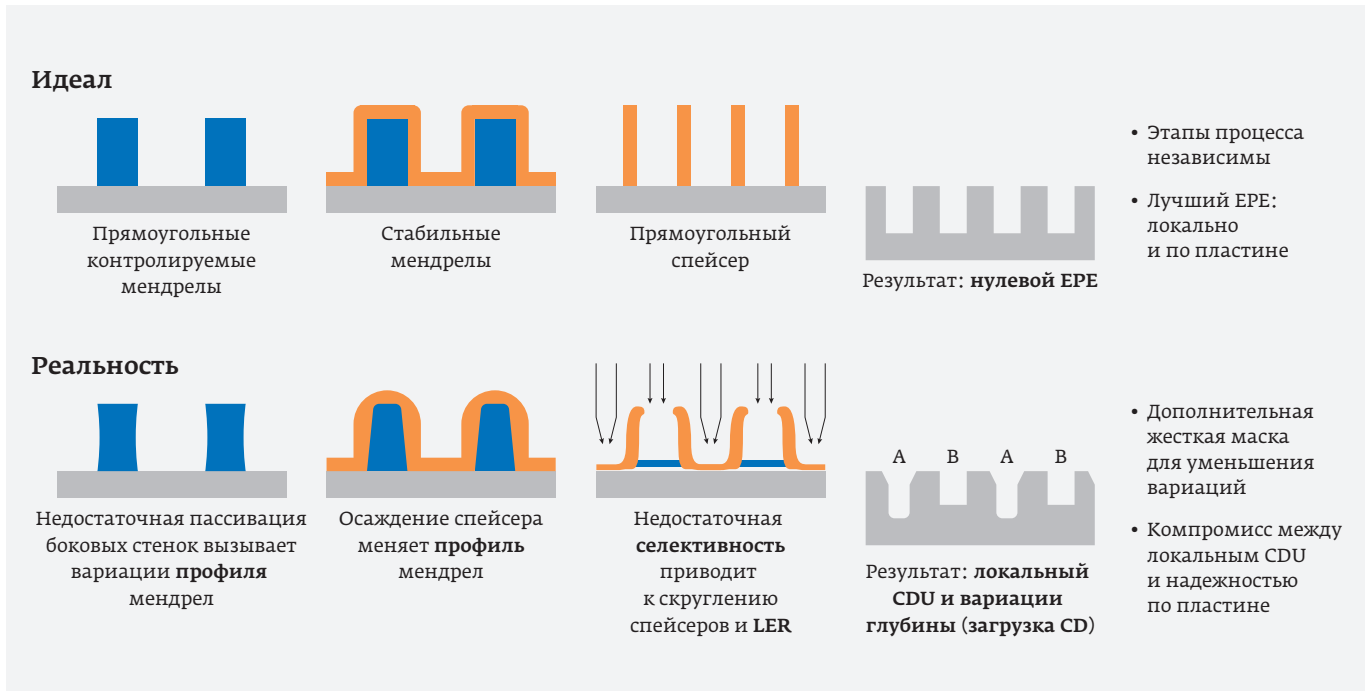


Рис. 14. SADP: идеал и реальность [12]

ландской фирме Маррет, удастся добиться производительности своего литографа в 10 пл / ч и необходимой для производства наработки литографа на отказ.

МЕТОД МНОГОЦВЕТНОГО СЕЛЕКТИВНОГО ТРАВЛЕНИЯ

Помимо уменьшения EPE, одновременно одной из основных тенденций в масштабировании является разработка маршрутов, менее чувствительных к EPE – например, маршруты формирования линий, основанные на методе многоцветного травления (multicolor etching, self-aligned blocking). Этот подход увеличивает окно процесса по точности совмещения маски подрезания с массивом линий примерно в три раза (с величины полуширины линий до величины 3×полуширина) за счет высоких взаимных селективностей к травлению применяемых материалов [1].

На рис. 12 изображены подрезания (LELE) типового массива линий (слева) и многоцветного массива (справа). В стандартном случае при подрезании линии из материала В допустимым перекрытием разреза линии А является полуширина линии А. В случае многоцветного подхода материалы В и С выбираются таким образом, что каждый из этих материалов можно удалить селективно относительно другого, а также относи-

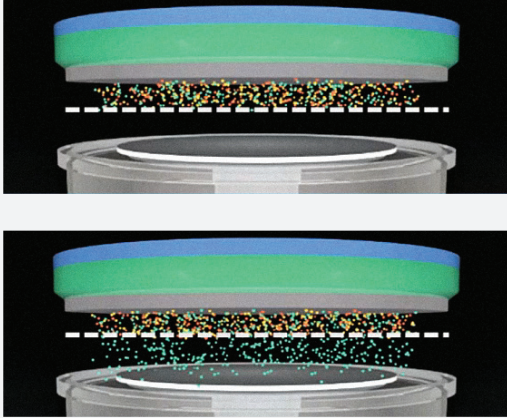
тельно материала А. А значит, при травлении линии В линия С травиться не будет, и поэтому перекрытие разрезом линии С ни на что не влияет. И аналогично для последующего подрезания линии С. За счет чего в указанном направлении допустимая ошибка совмещения значительно возрастает.

При этом, формирование многоцветного массива не требует принципиального усложнения маршрута. Пример такого маршрута приведен на рис. 13. До этапа 13.3 маршрут совпадает со стандартным SADP, затем на этапе 13.4 проводится нанесение из раствора материала С с его последующим травлением до вскрытия линий из материалов А и В.

КОНТАКТНЫЕ ОКНА

Для формирования контактных окон на данный момент применяется метод LELE (LELELE, ...). Учитывая наличие ошибки совмещения, а также то, что даже метод LELELELE позволяет уменьшить CD лишь вдвое, для формирования контактных окон является актуальным другой самосовмещенный метод – DSA (Directed Self-Assembly, направленная самосборка) [9]. Этот метод основан на управляемых поверхностями структур разделении вещества (блок-сополимера) на разные фазы в процессе отжига [10]. Разработкой DSA занимаются веду-

Как достичь максимальной селективности травления?



- Плазма создает химию травления
- Ионы блокируются, химия проходит
- **Максимальная селективность** без повреждения поверхности и образования полимерных побочных продуктов

Selectra Etch создает специализированную химию для максимальной селективности

Рис. 15. Схема камеры установки газового травления [12]

шие исследовательские центры Leti во Франции и IMEC в Бельгии. О важности и ближайших перспективах комплементарного метода DSA, внедрение которого на контактных окнах ожидается в ближайшее время, свидетельствует тот факт, что на мировом форуме по литографии SPIE2018 в Сан Хосе под DSA, ML2 и NIL создана отдельная секция Workshop [11]. С 2015 года IMEC в сотрудничестве с Leti, SEMATECH и EIDEC организован ежегодный международный симпозиум, посвященный исключительно DSA.

ТРАВЛЕНИЕ

Упомянутый ранее параметр EPE можно представить в другом виде – как совокупность погрешностей процессов литографии, травления и осаждения.

Благодаря применению самосовмещенных методов и неуклонному улучшению производителями характеристик сканеров, относительный вклад ошибок совмещения – основных литографических ошибок – уменьшается, несмотря на увеличение числа литографий. Вклад же (и относительный, и абсолютный) технологических ошибок увеличивается, что, как ни странно, тоже связано с увеличением числа литографий. Ведь при этом также значительно увеличивается количество операций осаждения и травления.

Рассмотрим ошибки травления на примере процесса SADP. В идеальном случае мендрелы имеют прямоугольный профиль, и профиль такой формы слабо чувствителен к вариациям процесса. Однако, в реальности форма мендрел отличается

от прямоугольной, поэтому любые вариации процесса или материалов вызывают погрешности EPE, которые не всегда предсказуемы, поскольку сама форма профиля также непредсказуема. Осаждение спейсера не должно в идеале менять профиль мендрелы, и профиль спейсера не зависит, например, от времени осаждения. Но в реальных процессах осаждение спейсера меняет профиль мендрелы из-за окисливания и стрессов, вызванных повреждениями профиля мендрелы на этапе травления. Из-за ограниченной селективности и эффекта загрузки при травлении форма спейсеров на третьем этапе также не совпадает с идеальной. Из-за этого при последующем травлении возникают вариации CD, глубины канавок и их профиля [12].

На решение этих проблем компаниями Applied Materials, Lam Research, Tokyo Electron направлено создание все более сложного и прецизионного оборудования для травления, осаждения, разработки и применения новых материалов, оптимизации процессов.

Высокая селективность критически важна для прецизионного травления и, в особенности, для уже рассмотренного метода многоцветного травления. Ее, а также минимизацию повреждений поверхности, может обеспечить газовое химическое травление, к которому сейчас проявляется большой интерес. Компания Amate уже реализовала свои разработки в этой области в установке газового травления Selectra™ [12]. На рис. 15 представлено схематичное устройство камеры этой

установки. В верхней части камеры с помощью плазмы генерируются активные радикалы. Специальная система, разделяющая камеру на две части, пропускает эти радикалы к подложке, но блокирует проход для ионов, электронов и сопровождаемого плазму ультрафиолетового излучения. Полученные результаты демонстрирует рис. 14. Проведено селективное удаление аморфного кремния без повреждений остальных диэлектриков и с CD до нескольких размеров атомов кремния.

Таким образом, комбинируя газовое травление с новыми материалами и реакторами для осаждения и планаризации, можно значительно снизить величину EPE и требования к совмещению структур.

ВЫВОДЫ

Требования, предъявляемые к размерам и качеству формируемых критических структур для передовых технологических норм, в разы превосходят возможности аппаратного разрешения иммерсионной литографии. Поскольку это аппаратное разрешение, по-видимому, достигло своего предела, формирование критических минимальных размеров происходит за счет нескольких последовательных литографий и травлений (LELE) или за счет дополнения литографии несколькими операциями осаждения и травления (SADP/SAQP).

При этом из-за увеличения числа операций возрастает число вариаций, а уменьшение размеров структур увеличивает относительный вклад каждой вариации. Поэтому уменьшение величины EPE – параметра, характеризующего общую ошибку структуры – является основной задачей масштабирования.

Несмотря на возникающие проблемы, некоторые гигафабрики уже объявили о начале производства передовых микросхем с проектными нормами 10^{-7} нм. Отвечая на эти вызовы, ведущие производители иммерсионных сканеров – ASML и Nikon – продолжают совершенствовать характеристики своих сканеров, в основном по точности совмещения и производительности (до 270 пл/ч). Именно эти характеристики имеют решающее значение для производств с применением иммерсионной литографии.

Борьба с EPE ведется за счет уменьшения ее отдельных составляющих: ошибки совмещения и технологической ошибки.

Улучшение совмещения достигается за счет применения самосовмещенных маршрутов, в том числе самосовмещенного мультипаттернирования и метода многоцветного травления.

При использовании самосовмещенного мультипаттернирования отдельным вопросом стоит преобразование полученного массива параллельных линий в линии металлизации. С помощью иммерсионной литографии этот переход можно сделать двумя способами: методом блокирования и методом подрезания. Сравнивая их, можно отметить, что стоимость метода подрезания ниже, и он является литографически более простым, однако данный метод предполагает отклонение от желаемой топологии, что нужно учитывать путем проведения отдельного моделирования.

Отсутствие аналога SADP для формирования контактных и переходных окон с малыми технологическими нормами подстегивает разработку комплементарного, самосовмещенного метода DSA.

На величину технологической ошибки – на данный момент, наиболее критической составляющей EPE – значительное влияние оказывают операции травления и осаждения. Улучшения LER, селективности и устранение эффекта загрузки можно достигнуть посредством хорошей оптимизации процесса плазменного травления для конкретных материалов или же, используя газовое травление, получившее толчок к развитию в свете последних тенденций. Такой способ травления позволит получить максимальную селективность травителя при отсутствии неконтролируемых повреждений структур.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Raley A., Mohanty N., Sun X. [et. al]** Self-aligned blocking integration demonstration for critical sub-40nm pitch Mx level patterning // Proc. SPIE10149, Advanced Etch Technology for Nanopatterning VI, 101490O (7 April 2017)
2. **Owa S., Hirayanagi N.** Expected innovations of optical lithography in the next 10 years // Proc. SPIE9780, Optical Microlithography XXIX, 978004 (15 March 2016)
3. Technology Node // Semiconductor & Computer Engineering. URL: https://en.wikichip.org/wiki/technology_node

4. **Wei Yayi, Brainard R.L.** Advanced Processes for 193-nm Immersion Lithography // Bellingham, Wash., SPIE, 2009. С. 171-176.
5. Intel and Nikon Technologists Discuss Scaling Challenges for the Next Node // The Nikon eReview. 2017. URL: <https://nikonereview.com/2016/intel-and-nikon-technologists-discuss-scaling-challenges-for-the-next-node/>
6. **Lijun Zhao, Wei Yayi, Tianchun Ye.** Analysis of Multi-e-beam Lithography for Cutting Layers at 7 nm // J. of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 15(4), 043501 (2016).
7. **Abercrombie D.** Self-Aligned Double Patterning - Part Deux. URL: <http://semiengineering.com/self-aligned-double-patterning-part-deux/>
8. **Abercrombie D.** Fill/Cut Self-Aligned Double-Patterning. URL: <http://semiengineering.com/fillcut-self-aligned-double-patterning/>
9. International Technology Roadmap for Semiconductors 2.0. 2015 Edition
10. **Красников Г.Я., Гущин О.П., Литаврин М.В., Горнев Е.С.** DSA - комплементарный метод усиления разрешения иммерсионной литографии // Электронная Техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2017. С. 4-17.
11. Leti @SPIE Advanced Lithography 2018 // CEA-Leti. URL: <http://www.leti-cea.com/cea-tech/leti/english/Pages/What's-On/Events/Leti-at-SPIE-Advanced-Lithography-2018.aspx>
12. **Freed R., Mitra U., Zhang Ying.** Impact of materials engineering on edge placement error (Conference Presentation) // Proc. SPIE10149, Advanced Etch Technology for Nanopatterning VI, 1014905 (27 April 2017).

ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОЙ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МОРФОЛОГИЮ И АВТОЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

► Р. К. Яфаров, В. Я. Шаныгин
СФ ИРЭ РАН

Исследовано влияние плазмохимической модификации поверхности на автоэмиссионные свойства кристаллов кремния. Показано, что травление пластин кремния в высокоионизованной микроволновой плазме с использованием хладона-14 позволяет управлять в широких пределах порогом напряженности электрического поля и максимальными плотностями автоэмиссионных токов. Рассмотрены физико-химические механизмы, ответственные за модификацию поверхности и автоэмиссионные характеристики кристаллов кремния.

INFLUENCE OF MICROWAVE PLASMA-CHEMICAL PROCESSING ON MORPHOLOGY AND FIELD EMISSION PROPERTIES OF CRYSTALS OF SILICON

R. K. Yafarov, V. Ya. Shanygin
IRE RAS

Influence of plasma-chemical modification of a surface on field emission properties of crystals of silicon is investigated. It is shown, that etching of plates of silicon in high-ionized microwave plasma with use of freon-14 allows operating over a wide range a threshold of electric field strength and the maximum density of field emission currents. Are considered physics – chemical mechanisms responsible for modification of a surface and field emission characteristics of crystals of silicon.

В вакуумной микроэлектронике одним из наиболее привлекательных материалов для полевых источников электронов при создании активной элементной базы остается кристаллический кремний. В первую очередь это обусловлено развитой технологической базой, а также обнаруженными люминисцентными свойствами нанокристаллического кремния, которые позволяют надеяться на создание в будущем сверхбыстродействующих радиационно стойких кремниевых интегральных схем с оптической связью.

Недостатками полевых источников электронов на основе кремния являются высокая чувствительность к состоянию поверхности и низкие плотности автоэмиссионных токов, которые, как правило, находятся в интервале 50–150 мкА/см². Исполь-

зование высокоаспектных эмиттеров, а также различных конструктивных решений, направленных на повышение фактора усиления поля путем уменьшения радиусов эмитирующих острий, диаметров отверстий в управляющих электродах или созданием нанолезвийных планарных структур, приводит к усложнению технологии изготовления и сопровождается, как правило, снижением надежности и увеличением себестоимости автоэмиссионных устройств [1]. В связи с этим, интерес представляют исследования альтернативных путей, направленных на улучшение воспроизводимости и эмиссионных характеристик автокатодов, которые были бы связаны не только с конструктивными, но и с физико-химическими модификациями эмитирующих поверхностей кремниевых кристаллов.

Целью работы стали исследования возможности плазмохимической модификации морфологии и автоэмиссионных свойств полевых источников электронов, изготовленных на основе кристаллов кремния.

Модификация поверхности кристаллов Si (100) n-типа с удельным сопротивлением 0,01–0,02 Ом·см проводилась в установке с использованием ионно-плазменного источника на частоте 2,45 ГГц при мощности излучения 250 Вт [2]. Для плазменного удаления естественного оксидного покрытия на кремнии использовались хладон-14 при давлении 0,1 Па. Величины ускоряющих напряжений (U_c) на подложкодержателе в процессах травления были фиксированными и равными -100 и +100 В. Глубина травленного слоя составляла около 100 нм. В качестве контрольных образцов для сравнения морфологии и автоэмиссионных характеристик использовались пластины кремния с естественным оксидным покрытием. Морфологические характеристики исследовались с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver-P-47. В качестве зондов применялись стандартные кремниевые кантилеверы CSG10 пирамидальной формы с радиусом закругления 10 нм и жесткостью 0,1 Н/м. Схема регистрации отклонения кантилевера обеспечивала разрешение 0,1 нм при шаге АЦП пьезосканера по оси Z, равном 0,05 нм. Для обработки полученных АСМ данных использовалась программа Image Analysis 2. Автоэмиссионные свойства исследовались в условиях высокого вакуума (10^{-5} Па) на диодной структуре, позволяющей изменять расстояние между электродами с точностью до 1 мкм.

На рис. 1 приведены распределения плотностей высот выступов на пластинах кремния до и после их плазменного травления при различных смещениях в среде хладона-14. Соответствующие АСМ-

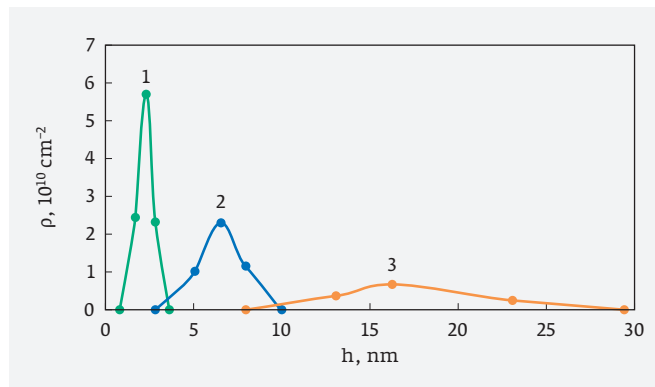


Рис. 1. Распределения поверхностных плотностей высот выступов на кремнии n-типа до (1) и после обработки в плазме хладона-14 при $U_c = -100$ В (2) и при $U_c = 100$ В (3)

изображения морфологии пластин приведены на рис. 2. Видно, что пластины с естественным оксидным покрытием имеют наименьшую высоту выступов и наибольшую их поверхностную плотность. Наибольшую высоту выступов, которая превосходит исходную более чем в семь раз, и наименьшую поверхностную плотность имеют пластины после травления в плазме хладона-14 при $U_c > 0$.

В табл. 1 приведены морфологические и автоэмиссионные характеристики пластин кремния с естественным оксидным покрытием и обработанных в плазме хладона-14. Усредненные расстояния между выступами получены расчетом из соответствующих поверхностных плотностей. За порог начала автоэмиссии принята напряженность поля, при которой плотности автоэмиссионных токов превышали 40 мкА/см². По данным табл. 1, на рис. 3 построены зависимости напряженностей электрического поля порога и максимальных плотностей

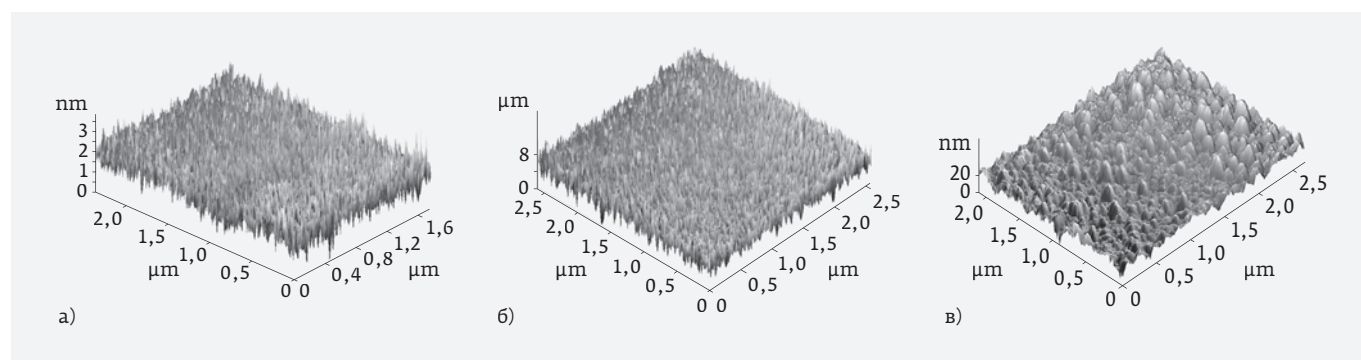


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности кристаллов кремния n-типа до (а) и после обработки в плазме хладона-14 при $U_c = -100$ В (б) и при $U_c = 100$ В (в)

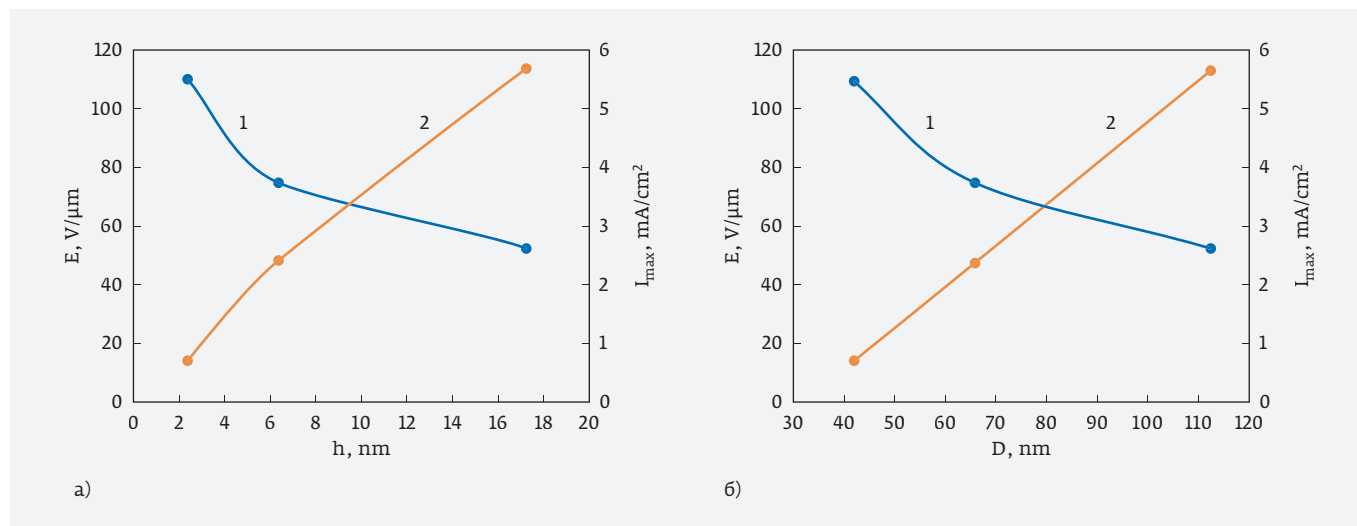


Рис. 3. Зависимости напряженностей электрического поля порога (1) и максимальных плотностей токов автоэмиссии (2) пластин кремния (100) п-типа до и после плазменного травления в хладоне-14 от высоты (а) и расстояния (б) между выступами.

токов автоэмиссии от высоты и расстояния между выступами для исходных пластин кремния и обработанных в различных режимах в плазме хладона-14. Видно, что с увеличением высоты и расстояния между выступами существенно увеличиваются максимальные автоэмиссионные токи при одновременном уменьшении порогов автоэмиссии. Большое влияние на автоэмиссионные характеристики оказывает знак потенциала смещения. Максимальная плотность тока автоэмиссии практически на порядок превышает плотность тока с пластин кремния без обработки.

Согласно современным представлениям, характер приведенных на рис. 3 зависимостей обусловлен геометрическими факторами, связанными с изменениями коэффициентов усиления поля Q на отдельных эмитирующих выступах и их взаимной экранировкой. В первом приближении коэффициент Q обратно пропорционален напряженности поля порога возбуждения автоэмиссии и, согласно закону Фаулера – Нордхейма, нелинейным образом определяет величину плотности тока автоэмиссии [4]:

$$j = A \cdot \frac{(E_{cp} \cdot Q)^2}{\varphi} e^{-\frac{B\varphi^{3/2}}{E_{cp} \cdot Q}}, \quad (1)$$

где A , B – некоторые коэффициенты, φ – работа выхода электрона из материала, E_{cp} – средняя величина напряженности внешнего электрического поля, которая через коэффициент Q определяет напряженность поля на отдельном микровыступе.

Из электростатического рассмотрения следует, что коэффициент Q линейно связан с высотой микровыступов и зависит от их поверхностной плотности. С увеличением последней выше некоторого значения, зависящего от высоты выступов, величина Q начинает уменьшаться из-за экранирования внешнего электрического поля соседними выступами. Это снижает напряженность электрического поля на вершинах отдельных эмиссионных центров и для возобновления автоэмиссии требует увеличения напряженности внешнего электрического поля. Одновременно с этим, согласно выра-

Таблица 1. Влияние смещения плазменной обработки на параметры морфологии и автоэмиссионные свойства кристаллов кремния (100) п-типа проводимости

Режим плазменной обработки	Хладон-14		Без обр.
	-100 В	+100 В	
Высота выступов, h , нм	6,4	17,2	2,4
Плотность выступов, $\rho \cdot 10^{10}$, cm^{-2}	2,3	0,8	5,8
Расстояние между выступами, D , нм	66	112	42
E , В/мкм	75	52,5	110
J_{max} , МА/СМ ²	2,4	5,7	0,7

жению (1), с уменьшением Q уменьшается плотность тока автоэмиссии.

При плазмохимическом травлении в среде CF_4 вид, плотность потока и энергия заряженных частиц (электронов и химически активных ионов), поступивших на поверхность, зависят от величины и знака потенциала смещения на подложкодержателе. При отрицательном смещении основными химически активными частицами, поступающими на поверхность, являются положительные ионы C^+ , CF_n^+ , где $n=1..4$, а также радикалы CF_n и нейтральные атомы фтора, углерода и CF_4 . При положительном смещении, кроме радикалов CF_n , основными компонентами плазмы, поступающими на поверхность кремния, являются электроны и отрицательно заряженные ионы фтора. В связи с большим различием масс атомов и электронов, кинетическая энергия, передаваемая атому или молекуле при столкновении с электроном, достаточно мала. Это снижает скорость активации атомов адсорбата. Поэтому скорость плазмохимического травления кремния при $U_c = +100$ В составляет около 5,15 нм/мин. Это более чем в четыре раза меньше скорости травления при $U_c = -100$ В, которая составляет 21,25 нм/мин.

Скорость ионно-индуцированного травления (V_j) пропорциональна плотности ионного потока на подложку и степени заполнения θ поверхности адкомплексами SiF_2 [2]:

$$V_j = Kj\theta\alpha, \quad (2)$$

где K – коэффициент распыления, то есть вероятность десорбции комплекса SiF_2 при попадании в него иона, $\alpha = M/(N_0 \cdot \rho)$, M – молярная масса кремния, ρ – плотность, N_0 – число Авогадро. В этом механизме травления преобладающим является образование на поверхности кремния после окончания процесса $\equiv Si-CF_m$, $\equiv Si-CF_2-Si$ и др. фторуглеродных комплексов [3, 4].

При положительном смещении на подложкодержателе механизм травления изменяется. Это обусловлено отсутствием ионной бомбардировки и неоднородностью распределения химического адсорбата по поверхности кремния. Наибольшая его концентрация реализуется в углублениях рельефа поверхности, где свободная энергия системы поверхность – плазма имеет минимальные значения. В условиях интенсивной электронной бомбардировки, которая осуществляет гетерогенную активацию химического адсорбата и подложки, это повышает степень заполнения адкомплексами SiF_2 и увеличивает скорость растравливания углублений

в результате изотропного по своей природе химического процесса, связанного с образованием летучего соединения SiF_4 . Скорость изотропного травления кремния, обусловленная этим механизмом, пропорциональна квадрату степени заполнения поверхности адкомплексами SiF_2 [3]:

$$V_s \approx \theta^2. \quad (3)$$

С увеличением длительности процесса за счет бокового растрыва стенок между отдельными углублениями плотность выступов уменьшается, а их высоты увеличиваются.

Различие в механизмах травления обуславливает различные морфологические характеристики поверхностей кристаллов кремния после плазмохимического травления в хладоне-14 при различных знаках U_c . При травлении с $U_c > 0$ высота выступов и расстояние между ними увеличиваются. В результате этого улучшается геометрический фактор поверхности – увеличивается коэффициент усиления Q и уменьшается взаимная экранировка выступами внешнего электрического поля. Это уменьшает пороги напряженностей полей автоэмиссии и увеличивает максимальные плотности автоэмиссионных токов. Однако, полученный характер корреляции порогов автоэмиссии и максимальных плотностей токов через коэффициент усиления поля Q не соответствует выражению (1), в котором взаимосвязь между этими параметрами должна описываться не обратно пропорциональной, а экспоненциальной функцией. Причина этого состоит в следующем.

Образующиеся после травления $Si-CF_m$ и/или $Si-F$ комплексы препятствуют возникновению и росту за счет диффузии кислорода диэлектрического потенциального барьера на атомно чистой поверхности кристаллов кремния в виде оксидов различного стехиометрического состава. Однако их образование, также как любой другой химический адсорбат, изменяет работу выхода электронов за счет изменения дипольного момента поверхности [5]. Из-за высокой электроотрицательности фтора увеличение дипольного момента особенно сильно в случае преобладания на поверхности $Si-F$ комплексов. Для перемещения электрона через дипольный слой необходимо совершить дополнительную работу. Это приводит к росту работы выхода по сравнению с атомно чистой поверхностью кремния. Однако, благодаря отсутствию диэлектрического барьера в виде оксидов кремния с одновременным улучшением геометрического фактора и обогащением поверхностных состояний электронами в результате нейтра-

лизации заряда донорных центров поверхностных атомов кремния с ненасыщенными химическими связями, максимальная плотность тока увеличивается, а порог автоэмиссии уменьшается более чем в два раза.

При $U_c < 0$ преобладающими являются $\equiv\text{Si}-\text{C}_n\text{F}_m$ комплексы, которые на границе с кремнием образуют фтор-углеродную диэлектрическую поверхностную фазу. В этом случае автоэмиссия так же как в случае с естественным оксидным покрытием будет осуществляться за счет двуступенчатого туннелирования электронов из зоны проводимости кремния через карбид-кремниевый диэлектрический барьер во фтор-углеродную поверхностную фазу и затем в вакуум. Вероятность такого туннелирования существенно ниже, чем в случае образования монослойных Si-F комплексов при травлении кремния в хладоне-14 с положительным смещением. Кроме того, носители, инжектированные из кремниевой подложки в Si-C_nF_m поверхностный слой, могут взаимодействовать с дефектами, расположенными в его объеме. Результатом этого является захват носителей на ловушечные центры, который приводит к дополнительному увеличению порога автоэмиссии и снижению максимальных плотностей токов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10033).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гуляев Ю. В., Абаньшин Н. П., Горфинкель Б. И. и др.** Новые решения для создания перспективных приборов на основе низковольтной полевой эмиссии углеродных наноразмерных структур // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 11. С. 63.
2. **Яфаров Р. К.** Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. – М.: Физматлит, 2009.
3. **Яфаров Р. К.** Прекурсорная самоорганизация при СВЧ вакуумно-плазменном осаждении субмонослойных углеродных покрытий на кристаллах кремния (100) // ФТП. 2015. Т. 49. Вып. 3. С. 329-335.
4. **Ивановский Г. Ф., Петров В. И.** Ионно-плазменная обработка материалов. – М.: Радио и связь, 1986. 232 с.
5. **Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А. и др.** Введение в физику поверхности. – М.: Наука, 2006. 490 с.

ЭФФЕКТИВНЫЕ УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ С НИТЕВИДНЫМИ ПОРАМИ, ЗАПОЛНЕННЫМИ ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДОМ

► Г. Я. Красников¹, В. В. Бардушкин², Д. А. Карташов^{1, 2}, А. А. Кочетыгов², Ю. И. Шильева², В. Б. Яковлев²
¹АО «НИИМЭ», ²НИУ «МИЭТ»

Решается задача численного моделирования эффективных упругих характеристик композитов типа нановолокна поливинилиденфторида в матрице анодного оксида алюминия. Исследованы зависимости компонент тензора эффективных модулей упругости и коэффициентов упругой анизотропии от параметра структуры композитов, связанного с концентрацией волокон.

EFFECTIVE ELASTIC CHARACTERISTICS OF THE ANODIC ALUMINA HAVING THREADLIKE PORES FILLED WITH POLYVINYLIDENE FLUORIDE

G. Ya. Krasnikov¹, V. V. Bardushkin², D. A. Kartashov^{1, 2}, A. A. Kochetygov², Yu. I. Shilyaeva², V. B. Yakovlev²

¹MERI SC, ²MIET

Numerical modeling of the effective elastic characteristics in the polyvinylidene fluoride-filled anodic alumina is carried out. Dependencies of tensor components of effective elastic modules and coefficients of elastic anisotropy on the parameter of composites structure, connected with concentration of polyvinylidene fluoride nanowires, are investigated.

ВВЕДЕНИЕ

Достаточно простым и удобным способом наноструктурирования полимеров, обладающих, в частности, пьезоэлектрическими свойствами (поливинилиденфторид (ПВДФ) и сополимеры на его основе), является смачивание расплавами и растворами этих полимеров матриц пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) [1]. Наноструктурирование ПВДФ и его сополимеров с трифторэтиленом интересно с точки зрения применения для сверхчувствительных пьезоэлектрических датчиков в медицине и робототехнике [2–4]. Кроме того, путем заполнения пор полимерами возможна реализация некоторых оптических функций, таких как спектральная селекция, поляризация и оптическое переключение [5].

При анализе работоспособности изделий и приборов, использующих такие материалы, необхо-

димо иметь данные об их механическом поведении. В основе подобного анализа лежит вычисление не только их локальных (внутренних) упругих свойств [6] и средних (по материалу) напряжений [7], но и эффективных (эксплуатационных) упругих характеристик [8, 9]. Поэтому задача прогнозирования эффективных упругих свойств композитов типа «нитевидные включения ПВДФ – ПАОА-матрица» является актуальной.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Для решения задачи прогнозирования эффективных упругих характеристик ПАОА, заполненного ПВДФ, необходимо, во-первых, связать расстояние между волокнами ПВДФ с параметрами структуры, которые можно непосредственно измерить. Во-вторых, требуется получить удобные для чис-

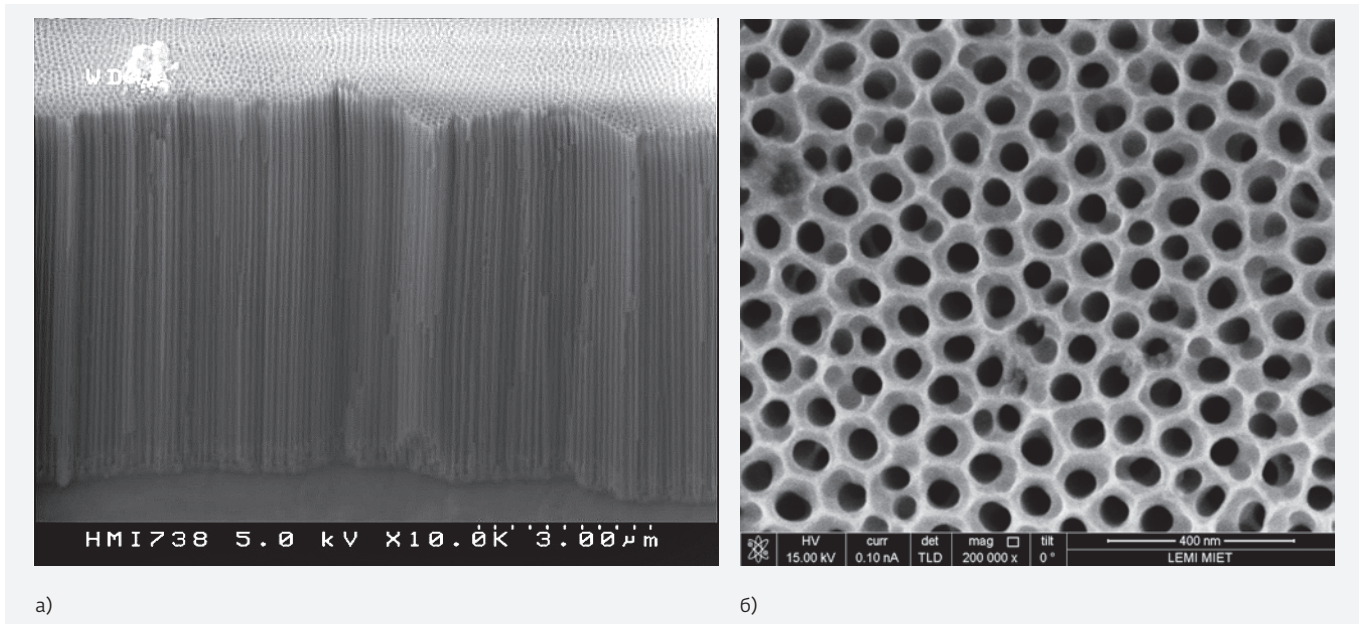


Рис. 1. Микрофотографии скола (а) и поверхности (б) ПАОА, полученные методом растровой электронной микроскопии

ленного анализа расчетные соотношения, не потеряв при этом информации о структуре неоднородного материала.

Для проведения моделирования, как указывалось, необходимо учитывать реальную структуру наноконструктов. ПАОА представляет собой ячеистую структуру, в поперечном сечении которой находятся правильные шестиугольники, примыкающие друг к другу своими сторонами, что подтверждается экспериментальными данными растровой электронной микроскопии (рис. 1). Поэтому будем считать, что в рассматриваемом однонаправленно армированном композите компоненты изотропны, положение волокон в объеме матрицы является случайным, однако в целом материал предполагается статистически однородным. Это приводит к наличию среднего расстояния между волокнами, которое может быть связано с их концентрацией.

Рассмотрим некоторый усредненный элементарный объем в виде правильной шестиугольной призмы, в центре которого находится одно цилиндрическое волокно, ориентированное вдоль оси z лабораторной системы координат. На рис. 2 изображено сечение в одном элементарном объеме, перпендикулярное к оси z. Пусть отдельное нитевидное волокно имеет средний радиус r , а расстояние от центра правильного шестиугольника до его стороны равно $r+h$. Тогда площадь основания элементарной ячейки будет $S = 2\sqrt{3}(r+h)^2$, а площадь поперечного

сечения волокна $S_B = \pi r^2$. Считая, что концентрация волокон $V_B = S_B/S$ (здесь и далее индекс «В» обозначает величины, относящиеся к волокнам, а «М» – к матрице), получим:

$$V_B = \frac{\pi}{2\sqrt{3}(1+h/r)^2}, V_M = 1 - V_B.$$

Отсюда параметр h/r , характеризующий структуру композита, может быть выражен через концентрацию волокон ПВДФ в виде

$$\frac{h}{r} = \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{3}V_B}} - 1. \quad (1)$$

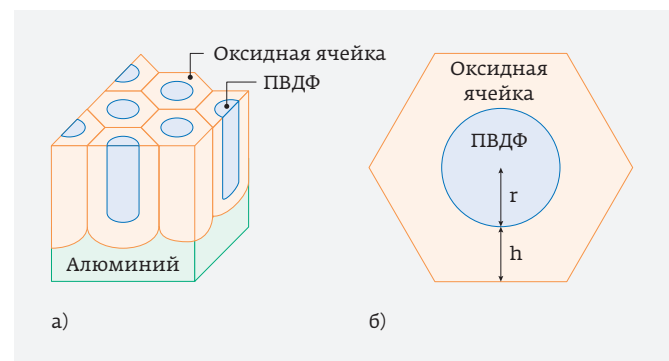


Рис. 2. Схематическое представление структуры материала: а – несколько элементарных объемов; б – элементарный объем в плоскости поперечного сечения

Очевидно, что максимально возможное значение концентрации нитевидных волокон в данной модели будет в случае, когда $h/r \rightarrow 0$, что соответствует $V_B \rightarrow \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 0,9$. Минимальное значение кон-

центрации волокон ПВДФ характеризует случай, когда $h/r \rightarrow \infty$, откуда $V_B \rightarrow 0$. Данный диапазон концентрации волокон ПВДФ соответствует границам применимости рассматриваемого метода расчета свойств подобных материалов.

Эффективные упругие характеристики матричных композитов определяются с помощью тензора четвертого ранга c^* , связывающего средние значения напряжений $\langle \sigma_{ij}(\vec{r}) \rangle$ и деформаций $\langle \epsilon_{kl}(\vec{r}) \rangle$ в материале $(i, j, k, l = 1, 2, 3)$:

$$\langle \sigma_{ij}(\vec{r}) \rangle = c_{ijkl}^* \langle \epsilon_{kl}(\vec{r}) \rangle,$$

где \vec{r} – радиус-вектор случайной точки среды, угловые скобки здесь и далее определяют процедуру усреднения по объему [10].

Эффективные упругие характеристики получаются из решения системы стохастических дифференциальных уравнений 2-го порядка (уравнений равновесия). Для бесконечной среды решение этой системы можно отыскать, используя обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей, физически означающее предположение однородности полей напряжений и деформаций в пределах отдельного элемента неоднородности. Расчетная формула в этом случае имеет следующий вид:

$$c^* = \langle c(\vec{r})(I - g c''(\vec{r}))^{-1} \rangle \langle (I - g c''(\vec{r}))^{-1} \rangle^{-1}, \quad (2)$$

где I – единичный тензор четвертого ранга; g – интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия [10], являющийся тензором четвертого ранга с компонентами

$$g_{ijkl} = a_{ij(kl)(j)}, \quad (3)$$

где $a_{ijkl} = -\frac{1}{4\pi} \int n_k n_j t_{il}^{-1} d\Omega$, $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$, t_{il}^{-1} – элементы

матрицы, обратной матрице T с элементами $t_{il} = c_{iklj}^c n_k n_j$, а n_k и n_j ($k, j = 1, 2, 3$) – компоненты вектора внешней нормали к поверхности включения. Для эллипсоидальных включений с главными полуосями l_1, l_2 и l_3 компоненты вектора нормали определяются соотношениями

$$n_1 = \frac{1}{l_1} \sin\theta \cos\varphi, \quad n_2 = \frac{1}{l_2} \sin\theta \sin\varphi, \quad n_3 = \frac{1}{l_3} \cos\theta.$$

По парам индексов i и j , k и l , заключенным в выражении для компонент g_{ijkl} тензора g в круглые скобки, осуществляется операция симметризации. Верхний индекс «с» в записи компонент c_{iklj}^c тензора модулей упругости обозначает, что рассматриваются упругие характеристики однородного тела сравнения.

При рассмотрении включений в форме нитевидных нанокристаллов с главными полуосями $l_1 = l_2 = r$, $l_3 \rightarrow \infty$ для компонент вектора нормали будут выполняться соотношения

$$n_1 = \frac{1}{r} \sin\theta \cos\varphi, \quad n_2 = \frac{1}{r} \sin\theta \sin\varphi, \quad n_3 \rightarrow 0.$$

Отметим, что для двухкомпонентного композита, содержащего изотропные включения и матрицу, процедура усреднения (для некоторой случайной величины $a(\vec{r})$) сводится к суммированию [10, 11]:

$$\langle a(\vec{r}) \rangle = V_B a_B + V_M a_M, \quad (4)$$

где $V_B + V_M = 1$.

Возьмем в качестве параметров тела сравнения упругие характеристики матрицы [11]. Тогда в выражении (2) $c''(\vec{r}) = c(\vec{r}) - c_M$, причем $c''(\vec{r}) = c_B - c_M$ при расчетах в волокне, $c''(\vec{r}) = 0$ – в матрице. Отсюда, с учетом (4), из (2) получается выражение для вычисления эффективных упругих характеристик волокнистых композитов:

$$c^* = (V_B c_B (I - g(c_B - c_M))^{-1} + V_M c_M) (V_B (I - g(c_B - c_M))^{-1} + V_M I)^{-1}. \quad (5)$$

Здесь c_B и c_M – тензоры модулей упругости волокон ПВДФ и матрицы ПАОА соответственно; g – интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия с компонентами, вычисляемыми по соотношению (3).

ПРОВЕДЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

Далее в работе по соотношению (5) были проведены модельные вычисления по определению эффективных модулей упругости c^* для однонаправленных матричных композитов с изотропными компонентами типа волокна ПВДФ в матрице ПАОА. Упругие характеристики компонентов модельных волокнистых композитов следующие: ПВДФ – модуль Юнга 1,5 ГПа, коэффициент Пуассона 0,29, ПАОА – модуль Юнга 140 ГПа, коэффициент Пуассона 0,32 [12–15]. Взяв в качестве волокон эллипсоиды вращения с полуосями $l_1 = l_2 = r = 1$, $l_3 \rightarrow \infty$, по формуле (5)

были проведены вычисления компонент тензора c^* в зависимости от параметра структуры h/r , определяемого соотношением (1).

При операциях над тензорами в работе использовалась их матричная форма записи. При этом ненулевые элементы c_{ij} ($i, j = 1, \dots, 6$) симметрической матрицы тензора модулей упругости c для изотропного материала выражаются через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν следующим образом [10]:

$$c_{11} = c_{22} = c_{33} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}; c_{44} = c_{55} = c_{66} = \frac{E}{2(1+\nu)};$$

$$c_{12} = c_{13} = c_{23} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}.$$

Результаты модельных расчетов значений ненулевых элементов c_{ij}^* симметрической матрицы тензора эффективных модулей упругости c^* от изменения параметра структуры h/r приведены на рис. 3. Отметим, что на рис. 3 не приведена расчетная кривая для элемента c_{66}^* , значения которого, как показало моделирование, определяются с помощью соотношения $c_{66}^* = \frac{c_{11}^* - c_{12}^*}{2}$.

Также в работе были проведены расчеты коэффициентов упругой анизотропии A_x и A_z в направлениях соответственно осей x и z лабораторной системы координат:

$$A_x = \frac{c_{11}^* - c_{12}^*}{2c_{44}^*}, A_z = \frac{c_{33}^* - c_{23}^*}{2c_{66}^*}.$$

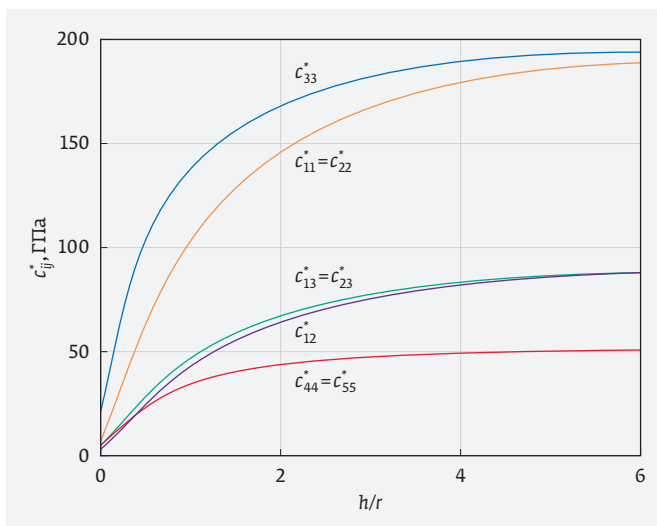


Рис. 3. Зависимости значений эффективных модулей упругости от параметра h/r

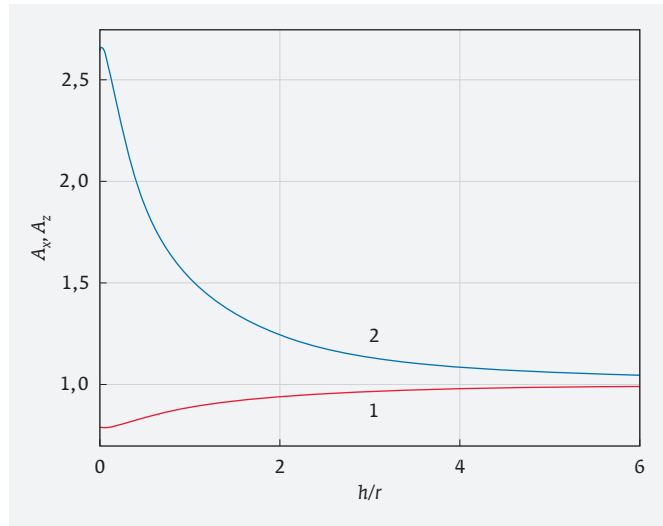


Рис. 4. Зависимости коэффициентов анизотропии A_x (кривая 1) и A_z (кривая 2) модельных композитов от параметра структуры h/r

Значения коэффициента анизотропии A_y (в направлении оси y) аналогичны значениям параметра анизотропии A_x .

На рис. 4 для рассматриваемых композитов представлены результаты модельных вычислений коэффициентов анизотропии A_x и A_z от изменения параметра структуры h/r .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на проведенных модельных исследованиях и расчетах эффективных модулей упругости однонаправленных матричных композитов с изотропными компонентами типа волокна ПВДФ в матрице ПАОА, можно заключить следующее.

1. Рассматриваемые композитные материалы обладают гексагональной симметрией эффективных упругих свойств [10], поскольку для ненулевых элементов c_{ij}^* симметрической матрицы тензора c^* выполняются следующие соотношения: $c_{11}^* = c_{22}^*$,

$$c_{44}^* = c_{55}^*, c_{13}^* = c_{23}^*, c_{66}^* = \frac{c_{11}^* - c_{12}^*}{2} \text{ (рис. 3)}.$$

2. При $0 < h/r < 6$ характер зависимости значений ненулевых c_{ij}^* от среднего расстояния между волокнами существенно нелинеен.

3. При $h/r > 6$ (т. е. при $V_B \rightarrow 0$) c_{ij}^* стабилизируются около значений, равных модулям упругости изотропного анодного оксида алюминия [10], для элементов c_{ij} матрицы тензора модулей упругости которого выполняются следующие соотношения: $c_{11} = 200,34$, $c_{44} = 53,03$, $c_{12} = 94,28$. Действительно, при

$h/r > 6$ для c_{ij}^* композитов начинают выполняться следующие равенства: $c_{11}^* = c_{22}^* = c_{33}^*$, $c_{44}^* = c_{55}^* = c_{66}^*$, $c_{12}^* = c_{13}^* = c_{23}^*$ (рис. 3). Кроме того, $A_x \rightarrow 1$, $A_z \rightarrow 1$ (рис. 4).

4. Наиболее сильная вариация анизотропии происходит в направлении оси z .

5. Значения параметров анизотропии в рассматриваемых композитных материалах наиболее сильно отклоняются от единицы при изменении параметра структуры h/r в пределах от 0 до 4.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-08-01374-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dersch R., Steinhart M., Boudriot U., Greiner A., Wendorff J. H.** Nanoprocessing of polymers: applications in medicine, sensors, catalysis, photonics // *Polymers for Advanced Technologies*. 2005. Vol. 16. No. 2–3. P. 276.
2. **Persano L., Dagdeviren C., Su Y., Zhang Y., Girardo S., Pisignano D., Huang Y., Rogers J. A.** High performance piezoelectric devices based on aligned arrays of nanofibers of poly (vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene) // *Nature communications*. 2013. No. 4. P. 1633.
3. **Liu Y., Weiss D. N., Li J.** Rapid nanoimprinting and excellent piezoresponse of polymeric ferroelectric nanostructures // *ACS nano*. 2009. Vol. 4. No. 1. P. 83–90.
4. **Ren G., Cai F., Li B., Zheng J., Xu C.** Flexible Pressure Sensor Based on a Poly (VDF-TrFE) Nanofiber Web // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2013. Vol. 298. No. 5. P. 541–546.
5. **Сокол В.А., Яковцева В.А., Шиманович Д.Л.** Особенности применения пористых оксидов алюминия // *Доклады БГУИР*. 2012. № 2(64). С. 21–27.
6. **Красников Г.Я., Бардушкин В.В., Силибин М.В., Шиляева Ю.И., Яковлев В.Б.** Концентрация напряжений и деформаций в анодном оксиде алюминия с нитевидными порами, заполненными поливинилиденфторидом // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*. 2016. № 2(162). С. 65–70.
7. **Красников Г.Я., Бардушкин В.В., Карташов Д.А., Шиляева Ю.И., Яковлев В.Б.** Влияние структуры и термоупругих характеристик компонентов на средние напряжения в анодном оксиде алюминия с нитевидными порами, заполненными поливинилиденфторидом // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*. 2017. 2(166). С. 45–50.
8. **Бардушкин В.В., Шиляева Ю.И., Яковлев В.Б.** Эффективные упругие характеристики пористо-заполненного металлическими нитевидными нанокристаллами анодного оксида алюминия // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2013. № 2. С. 21–26.
9. **Bardushkin V. V., Shilyaeva Yu. I., Gavrilo S. A., Silibin M. V., Yakovlev V. B., Zheludkevich M. L. and Popenko N. I.** Predictive modeling of mechanical properties of metal filled anodic aluminum oxide // *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2016. Vol. 11. No. 5. P. 583–594. DOI 10.2140/jomms.2016.11.583.
10. **Шермергрот Т.Д.** Теория упругости микронеоднородных сред. – М.: Наука, 1977. 399 с.
11. **Хорошун Л.П., Маслов Б.П., Лещенко П.В.** Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов. – Киев: Наукова думка, 1989. 207 с.
12. **Физические величины: Справочник / Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З.** – М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
13. **Xia Z., Riester L., Sheldon B. W., Curtin A., Liang J., Yin A., Xu J. M.** Mechanic properties of highly ordered nanoporous anodic alumina membranes // *Reviews of Advanced Materials Science*. 2004. Vol. 34. No. 6. P. 131–139.
14. **Gu P., Miao H., Liu Z. T., Wu X. P., Zhao J. H.** Investigation of elastic modulus of nanoporous alumina membrane // *Journal of Materials Science*. 2004. Vol. 39. Is. 10. P. 3369–3373.
15. **Справочник по пластическим массам (в 2-х т.). Т. 1 / Под ред. Катаева В.М., Попова В.А., Сажина Б.И.** – М.: Химия, 1975. 448 с.

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОФИЛЕЙ ИСПАРЕНИЯ МИКРОКАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ С ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ

► В. И. Анисимкин¹, Э. Верона², Н. В. Воронова^{1, 3}

¹ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН, ²CNR-IFN, ³ОАО «НИИ «Элпа»

Решена стандартная задача теплопроводности применительно к испарению капель летучих соединений с поверхности однородного изотропного стержня с теплоизолированными боковыми стенками. Получено выражение для профиля охлаждения стержня по глубине, отражающее его зависимость от времени с начала испарения и до его окончания. Выражение применено к испарению микрокапли этилового спирта с поверхности плавленого кварца. Результаты работы являются основой для разработки нового экспериментального метода исследования жидкостей.

THE TEMPERATURE PROFILE CALCULATION FOR MICRODROPLET EVAPORATION FROM SOLID ROD

V. I. Anisimkin¹, E. Verona², N. V. Voronova^{1, 3}

¹V.A.Kotel'nikov IRE RAS, ²CNR-IFN, ³«Elpa» Corporation

The standard thermal-balance approach is used to study the process of microdroplet evaporation from the surface of thermally isolated solid rod. Expression for the rod cooling profile is derived as a function of time starting from the beginning to the end of the process. The expression is applied for ethyl alcohol microdroplet on fused quartz as an example. Results of the paper are considered as the background for developing new experimental method for liquid analysis.

ВВЕДЕНИЕ

При проведении исследований и разработок в области физики, химии, биологии и медицины часто приходится прибегать к калориметрическим измерениям, так как тепловые процессы происходят практически во всех органических и неорганических средах [1]. Среди аналитических методов, применяемых для этих целей, метод, основанный на акустических волнах ультразвукового диапазона, считается одним из наиболее перспективных. Он обладает наиболее высокой точностью измерений выходного сигнала (частоты), допускает управление величиной и знаком отклика на одно и то же воздействие за счет выбора типа колебания, направления распространения, материала и/или кристал-

лографического среза звукопровода [2, 3] и зависит от действия сразу нескольких механизмов детектирования – механического, электрического и теплового [4]. При этом тепловой механизм остается пока наименее изученным.

В данной работе представлены результаты теоретического исследования этого механизма на примере фазового перехода первого рода – испарения капель жидкости с поверхности твердотельных стержней.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Исследуемая структура показана на рис. 1. Она состоит из твердотельного стержня и набора электромеханических преобразователей: пара встречно-

штыревых преобразователей возбуждает и принимает поверхностные волны Рэлея на верхней поверхности стержня, а решетка пластинчатых преобразователей генерирует объемные волны (SH-waves), зондирующие стержень на разных глубинах x от верхней поверхности. При использовании стержней из разных материалов эта поверхность покрывается одинаковым слоем, например, золота.

При проведении исследований капля жидкости наносится на верхнюю поверхность стержня, испаряется, охлаждает подложку и образует в нем температурный профиль $\Delta T(x,t)$, который меняется с глубиной x и временем t . Этот профиль, содержащий информацию о свойствах анализируемого жидкого вещества, измеряется семейством возбужденных волн как относительные изменения скорости $\Delta v/v$ каждой из них. Пересчет $\Delta v/v$ в $\Delta T(t,x)$ производится по хорошо известному выражению $\Delta T = (\Delta v/v) / \text{ТКС}$, где ТКС – температурный коэффициент скорости (именно он как зависящий от типа волны, направления распространения и материала стержня позволяет управлять величиной и знаком акустического отклика). Величина, знак, глубина проникновения и форма температурного профиля $\Delta T(t,x)$ являются ключевыми при разработке нового аналитического метода.

Для расчета температурного профиля решалась стандартная задача теплопроводности – определялся тепловой поток в длинном однородном изотропном стержне с теплоизолированными боковыми стенками от источника тепла, равномерно распределенного по его поверхности. Симметрия задачи позволяла рассматривать одномерное уравнение теплопроводности:

$$T_t(x,t) = a^2 \cdot T_{xx}(x,t), \quad (1)$$

где $T(x,t)$ – температура на глубине x в момент времени t , $a^2 = \kappa / \rho \cdot c_p$ – коэффициент температуропроводности материала стержня, κ , ρ и c_p – теплопроводность, плотность и теплоемкость этого материала соответственно. Поскольку коэффициент теплопроводности окружающего воздуха намного меньше, чем у подложки, считаем, что теплопроводность воздуха не влияет на процесс испарения капли. Кроме того, так как в рассматриваемом нами тепловом процессе на границе «капля – стержень» имеет место так называемое «частичное смачивание» (контактный угол $0 < \theta < \pi/2$), и капля большее время своего существования занимает практически всю площадь верхней поверхности, то предположе-

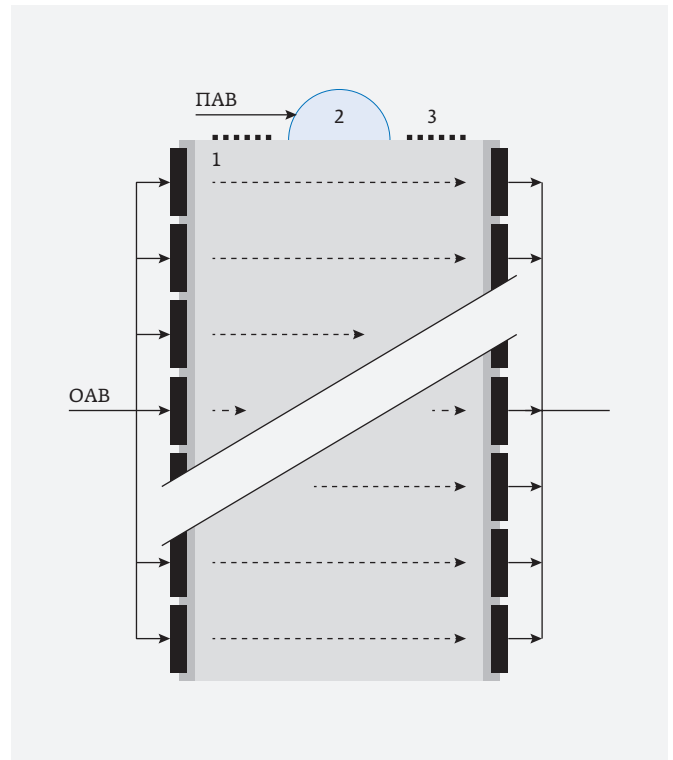


Рис. 1. Исследуемая твердотельная структура. ПАВ – поверхностная акустическая волна Рэлея, ОАВ – объемные акустические волны, 1 – твердотельный стержень, 2 – капля исследуемого вещества, 3 – встречно-штыревые преобразователи для возбуждения ПАВ

ние, что тепловой источник занимает всю верхнюю поверхность стержня, является оправданным.

Начальное условие отражает собой тот факт, что в начальный момент времени $t=0$ распределение температуры в стержне однородно, а сама температура равна температуре окружающей среды. Принимая для простоты температуру стержня и окружающей среды, равной нулю, начальное условие задачи записывается следующим образом:

$$T(x,0) = 0, \quad 0 \leq x \leq +\infty. \quad (2)$$

Граничное условие отражает тот факт, что в момент времени $t=0$ на поверхности стержня начинает действовать тепловой источник $\varphi(t)$:

$$T_x(0,t) = \varphi(t). \quad (3)$$

Далее, в соответствии с работой [5], считаем, что тепловые потоки, передающиеся на единицу объема (площади) капли за единицу времени являются постоянными, а следовательно, они постоянны и на

```

%PROGRAMME FOR THE CALCULATION OF THE TEMPORAL TEMPERATURE
%VARATIONS IN THE DEPTH OF THE SOLID PIVOT EXCITED BY EVAPORATING
% LIQUID DROPLET
%u(x,t)= - a/(sqrt(pi))*int(exp(-x^2/4/a^2/(t-tau))/sqrt(t-tau)*fi(tau)dtau(0 - t);
%NOTE: T must be an integer!!
%parameters are:
%coeffiecient of temperature conductivity, m^2/sec
a = 6.9845e-004; %fused quartz SiO_2
%a = 5.7035e-002; %Si
%modelled boundary condition, K/m
%for the 5mcl ethanol:
fi_0 = 200; %5microliters ethanol on SiO_2
%fi_0 = 210; %5 micloliters acetone on SiO_2
A= 2*a*fi_0/sqrt(pi); %common factor
t_max = 451; %maximum elaborating time in the timerange,sec
x = 0.001:0.001:0.02;
x = x'; %depths, m
T = 60; %evaporation time of the droplet,sec
t = 1:1:t_max; %time interval
t = t';
U = zeros(length(t), length(x)); %the initial temperature is defined as zero matrix
%the first time interval (0<=t<=T)
for j = 1:length(x)
xx = x(j); %current depth variable
p = xx/2/a; %parameter p
fori = 1:1:T
tt = t(i); %current time variable
w1 = + sqrt(tt)*exp(-p^2/(1e-010+tt)) - sqrt(pi)*p*erfc(p/sqrt(1e-010+tt));
w1=w1*A; %local temperature at the depth xx at a time tt
u(i)=w1;
u = u'; %transferring the column of temperatures (of time) into the row
%for let the creation the two-dimensional Massive of temperatures
U(i,j)=u(i); %entering this temperature in the Massive
end %end of time (first interval)
i_evap = i;
%the second time interval (t>=T)
for i = T+1:t_max;
tt = t(i); %current time variable
w2 = + sqrt(tt)*exp(-p^2/(1e-010+tt)) - sqrt(pi)*p*erfc(p/sqrt(1e-010+tt)) - sqrt(tt-T)*exp(-p^2/(1e-010+tt-T)) +
sqrt(pi)*p*erfc(p/sqrt(1e-010+tt-T));
%1e-010 is placed to avoid deleting by zero
w2=w2*A; %local temperature at the depth xx at a time tt
u2(i)=w2;
u2=u2'; %transferring the column of temperatures (of time) into the row
%for let the creation the two-dimensional Massive of temperatures
U(i,j)= u2(i); %entering this temperature in the Massive
end %end of time (second time interval)
[C,I]=max(U(:,j));
Tt(j)=I;
end %end of depth x;
%thus we obtained the Massive of temperatures in which an element u(i;j) represents the
%temperature at a depth j at a time i

%plotting the time variation of temperature at the proper depths:
%plot(t(:),U(:,1),'r.-',t(:),U(:,2),'g.-',t(:),U(:,3),'b.-')
%plot(t(:),U(:,2),'r')
plot(x(:),U(i_evap,:), 'b.-')
xlabel('depth, mm')
ylabel('\- DT, grad C')
%plot(x, Tt,'g.-')
zoom on
grid on

function alpha = alpha(x,Q,l,p,n);
alpha = (Q.*sinh(p.*x)./p - Q.*cosh(p.*l).*cosh(p.*x)./p./sinh(p.*l)).*cos(n*pi.*x./l);
return

function kali = kali(a,xx,tt,fi_0,u);
p=xx./2./a;
A=2*a*fi_0/sqrt(pi);
%kali = + sqrt(tt)*exp(-p.^2./tt) - sqrt(pi).*p.*erfc(p./sqrt(tt)) - u;
%kali = + sqrt(tt)*exp(-p^2/tt) - sqrt(pi)*p*erfc(p/sqrt(tt)) - u;
w1 = sqrt(tt)*exp(-p^2/(1e-010+tt)) - sqrt(pi)*p*erfc(p/sqrt(1e-010+tt));
kali = w1*A-u;

```

Рис. 2. Текст программы

единицу площади поверхности всего верхнего торца подложки, который полностью занят испаряющейся жидкостью. Это означает, что тепловой поток $\varphi(t)$, идущий от верхней поверхности вглубь стержня, не

меняется и равен φ_0 при $0 < t < \tau$ и 0 при $t < 0$ и $t > \tau$, где τ – время испарения (существования) капли.

С учетом сделанных предположений решение уравнения теплопроводности (1) методом Фурье

с начальными (2) и граничными (3) условиями дает:

$$T(x,t) = -\frac{2a\varphi_0}{\sqrt{\pi}} \left\{ -\sqrt{t} \exp(-x^2/4a^2t) + \frac{x\sqrt{\pi}}{2a} \left[1 - \Phi\left(\frac{x}{2a\sqrt{t-T}}\right) \right] \right\},$$

$$0 < t < \tau$$

$$T(x,t) = -\frac{2a\varphi_0}{\sqrt{\pi}} \left\{ -\sqrt{t} \exp(-x^2/4a^2t) + \frac{x\sqrt{\pi}}{2a} \left[1 - \Phi\left(\frac{x}{2a\sqrt{t-T}}\right) \right] + \right. \\ \left. \sqrt{t-T} \exp(-x^2/4a^2t) - \frac{x\sqrt{\pi}}{2a} \left[1 - \Phi\left(\frac{x}{2a\sqrt{t-T}}\right) \right] \right\},$$

$$\tau < t < +\infty, \quad (4)$$

где $\Phi(x, t)$ – интеграл Френеля.

Из уравнений (4) видно, что величина $T(x, t)$, меняющаяся с глубиной x и временем t , зависит от материала стержня (через значения $a^2 = \kappa / \rho \cdot c_p$) и вещества капли (через величину $\varphi(t)$). Вычисление $T(x, t)$ по этим уравнениям производилось с помощью программного пакета Matlab 6.1 (рис. 2).

Для примера в данной работе в качестве тестируемой жидкости использовался этиловый спирт, а материала стержня – плавленый кварц. Объем капель V , толщина подложек d и частота акустических волн f находились в пределах 0,5...10 мкл, 0,5...100 мм и 40...220 МГц соответственно. Расчеты по приведенной выше программе проводились с использованием материальных констант работы [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Результаты расчета представлены на рис. 3. Они показывают эволюцию температурного профиля при испарении капли этилового спирта объемом 5 мкл с поверхности плавленого кварца. Видно, что максимальное охлаждение капли $\Delta T = -0,65^\circ\text{C}$ достигается на поверхности подложки (при $x=0$) в момент полного исчезновения капли (при $t \approx 60$ с).

Зная температурный профиль и его связь с характеристиками стержня (4), можно (после соответствующей калибровки и по известным свойствам жидкости) определить коэффициент теплопроводности стержня κ . По тем же профилям может быть найден градиент температуры на границе капля – подложка $(dT/dx)_{x=0}$, полное количество выделенной (поглощенной) энергии $Q = \kappa S t \cdot (dT/dx)_{x=0}$ и удельная теплота испарения жидкости $q = Q/m$ (m – масса капли). Кинетика испарения капли может быть проанализирована по временной зависимости откликов зондирующих волн $\Delta v(t)/v$, время испарения τ – по исчезновению и появлению сигнала рэлеевской волны, распространяющейся через каплю, а скорость испарения – как отношение $r = m/\tau$.

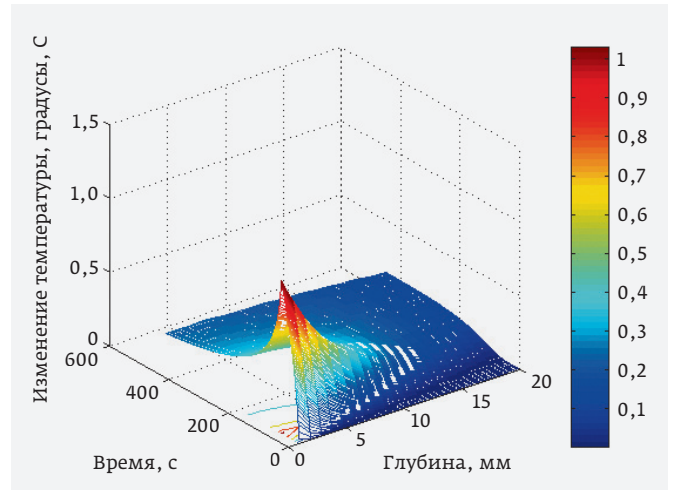


Рис. 3. Теоретический профиль охлаждения стержня из плавленого кварца при испарении 5 мкл этилового спирта

Разработка экспериментальной методики будет проведена в следующей работе.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

Данная работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-07-00074.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кальве Э., Прат А.** Микрокалориметрия. – М.: Иностранная литература, 1963. 187 с.
2. **Bender F., Dahint R., Losse F., Ricco A. J., Martin S. J.** Characteristics of acoustic plate modes on rotated Y-cuts of quartz utilized for biosensing applications // Analytical Chemistry. 1999. № 71. P. 5064–5067.
3. **Anisimkin I.V., Voronova N.V., Puchkov Yu.V.** General properties of the acoustic plate modes at different temperatures // Ultrasonics. 2015. V. 62. № 9. P. 46–49.
4. **Анисимкин В.И., Воронова Н.В.** Акустические волны для измерения параметров жидкости в одной области микропробы жидкости // Нелинейный мир. 2011. Т. 9. № 2. С. 116–118.
5. **Kruz V.A.** Fluid dynamic analysis of the droplet evaporation // Langmuir. 1992. № 8. P. 2829–2831.
6. Физические величины. Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. С. Мелихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. 489 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СБоеустойчивости СОЗУ С ФУНКЦИЕЙ ИСПРАВЛЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ СБоев ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЗЧ

► Г. Я. Красников¹, А. С. Лушников², В. Д. Мещанов², Е. С. Рыбалко²,
Н. Н. Фомичева², Н. А. Шелепин¹
¹ОАО «НИИМЭ», ²ООО «СИТРОНИКС-МД»

Представлены результаты исследования сбоеустойчивости СОЗУ с функцией исправления одиночных сбоев при воздействии ТЗЧ. Приведены модельные и экспериментальные зависимости сбоеустойчивости пилотных образцов СОЗУ емкостью 4 Мбит при воздействии ТЗЧ от частоты исправления информации. Показано соответствие модели и эксперимента.

STUDY OF THE FAULT TOLERANCE OF SRAM WITH THE FUNCTION OF CORRECTING SINGLE EVENT UPSETS CAUSED BY HEAVY IONS

G. Ya. Krasnikov¹, A. S. Lushnikov², V. D. Meschanov², E. S. Rybalko²,
N. N. Fomicheva², N. A. Shelepin¹
¹MERI SC, ²LLC "SITRONICS-MD"

The results of a study of the fault tolerance of SRAM with the function of correcting single event upsets caused by heavy ions are presented. The model and experimental dependencies of the fault tolerance of SRAM samples on the information correction frequency are shown. The correspondence between the model and the experiment is demonstrated.

ВВЕДЕНИЕ

Сбоеустойчивость при воздействии ТЗЧ является важнейшим свойством элементной базы электронных устройств космических аппаратов, для обеспечения которой применяются различные технические решения. Одним из способов обеспечения сбоеустойчивости СОЗУ является восстановление информации путем включения в состав микросхемы функции периодического исправления одиночных сбоев (ОС), возникающих в многозарядных словах СОЗУ при воздействии ТЗЧ. При этом частота восстановления (регенерации) достоверной информации должна выбираться таким образом, чтобы поддерживать на требуемом минимальном уровне вероятность возникновения в многозарядных словах неисправимых многократных сбоев (МС) кратности 2 и более.

В работе представлены модельные и экспериментальные результаты исследований сбоеустойчивости СОЗУ с функцией исправления ОС.

МОДЕЛЬ СБоеустойчивости СОЗУ С ФУНКЦИЕЙ ИСПРАВЛЕНИЯ ОС

Количественное описание сбоеустойчивости СОЗУ с функцией исправления ОС впервые представлено в работах [1, 2] в виде трех следующих соотношений. Соотношение (1) определяет количество МС (M_T) через количество (m) ОС, возникающих в СОЗУ в отсутствие регенерации, в [1] приведено его математическое обоснование.

Другое соотношение (2) связывает количество МС (M_S), возникающих за время наблюдения T_S в СОЗУ, информация в котором регенерируется с периодом регенерации $T_r < T_S$, с количеством МС (M_r), возник-

кающих в СОЗУ за время наблюдения (T_s) при отсутствии регенерации.

Соотношение (3) связывает частоту МС в СОЗУ (f_0), информация в котором регенерируется с периодом регенерации T_r , с частотой ОС f_{oc} .

$$M_r = \frac{m^2}{N}, \quad (1)$$

где N – количество слов в СОЗУ.

$$M_s = M_r \frac{T_r}{T_s}, \quad (2)$$

$$f_0 = f_{oc}^2 \frac{T_r}{N}. \quad (3)$$

Анализ выражений (1-3) показал следующее.

Для небольших значений m выражение (1) имеет погрешность до 300%. Например, $M_r = 4/N$ при $m=2$, в то время как правильное значение $M_r = 1/N$, с увеличением количества ОС m погрешность уменьшается, но остается не менее 100%.

Для случая, когда период регенерации T_r меньше времени появления ОС, количество МС M_r и частота МС f_0 должны быть равны нулю, поскольку каждый ОС будет скорректирован раньше, чем возникнет второй ОС, создающий вероятность возникновения МС. Однако, в соответствии с (2) и (3), количество МС M_r и частота МС f_0 сохраняют конечные положительные значения.

Соотношения (2) и (3) для количества МС и их частоты приведены без математического обоснования и не являются очевидными. Неизвестна погрешность, которой обладают эти соотношения.

В [3] представлен анализ известных из [1, 2] соотношений, а также получены новые соотношения, которые в совокупности представляют собой модель сбоеустойчивости СОЗУ.

Модель определяет частоту возникновения МС в зависимости от следующих параметров.

Параметры микросхемы:

- N – количество слов в микросхеме СОЗУ;
- σ [см²] – сечение одиночного сбоя микросхемы.

Временные параметры работы микросхемы:

- T_r – длительность одного цикла исправления (регенерации) информации во всех N словах микросхемы.

Параметры действующего на микросхему потока частиц:

- V [см⁻²] – поток частиц (флюенс), воздействующий на микросхему;
- G [см⁻²с⁻¹] – плотность воздействующего на микросхему потока частиц.

Выражение (1), связывающее количество МС и ОС, получено в [3] в уточненном виде (4):

$$M_r = \frac{m(m-1)}{2N}. \quad (4)$$

При $m=2$ выражение (4) дает правильное значение $M_r = 1/N$.

При $m \ll N$ количество многократных сбоев M_s кратности 2, которое возникает в СОЗУ с сечением одиночного сбоя σ и количеством информационных слов N , регенерируемых с временем цикла регенерации T_r , при воздействии на СОЗУ потока частиц плотностью G до величины флюенса V , определяется выражением:

$$M_s = \frac{VG\sigma^2}{2N} T_r \left(1 - \frac{T_1}{T_r}\right), \quad (5)$$

где $T_1 = 1/(G\sigma)$.

T_1 – время, в течение которого в микросхеме при воздействии на нее потока частиц плотностью G , возникает один ОС. В соответствии с (5) при $T_r \leq T_1$ в СОЗУ не возникают МС, поскольку каждый первый ОС будет исправлен до того, как в микросхеме возникнет второй ОС.

Для СОЗУ информационной емкостью 4 Мбит, содержащего 131 072 слова, погрешность выражения (4) и выражения (5), получаемого из (4), при $m < 1000$ составляет около 1%.

Высокая точность выражений (4) и (5) позволяет использовать их в качестве достоверного критерия сбоеустойчивости СОЗУ при испытаниях.

Разделив обе части (5) на T_s , получаем уточненное соотношение для частоты многократных сбоев:

$$f_0 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T_1}{T_r}\right) f_{oc}^2 \frac{T_r}{N}. \quad (6)$$

ПИЛОТНЫЙ ОБРАЗЕЦ СОЗУ С ФУНКЦИЕЙ ИСПРАВЛЕНИЯ ОС

Пилотный образец СОЗУ (СОЗУ4М) с функцией исправления ОС имеет доступный пользователю объем памяти 4 Мбит с организацией 131 072 слова по 32 бита. Образцы изготовлены по 0,24 мкм КМОП КНИ-технологии. Устойчивость СОЗУ к ОС достигается наличием в составе микросхемы встроенной функции регенерации информации на основе кода Хсяо [4], которая обеспечивает исправление в словах одиночных ошибок (сбоев) и обнаружение двойных ошибок. Для реализации этой функции каждое записываемое и хранимое в памяти 32-разрядное информационное слово при его записи дополняется в микросхеме семью контрольными разрядами, при

Таблица 1. Элементы функциональной схемы СОЗУ с функцией исправления ОС

<p>1. Традиционные элементы функциональной схемы СОЗУ Матрица ячеек памяти с организацией 131 072 × 39, дешифраторы, усилители считывания, детектор смены адреса, буферы сигналов управления, адреса и данных, устройство формирования традиционных для СОЗУ управляющих сигналов: CEN, OEN, WEN.</p>
<p>2. Элементы функциональной схемы СОЗУ, реализующие функции исправления одиночные сбоя 2.1. Устройство помехоустойчивого кодирования и декодирования информации на основе кода Хэяо. 2.2. Система регенерации информации в режиме MASTER (ведущий) или в режиме SLAVE (ведомый):</p> <ul style="list-style-type: none"> • счетчик адреса регенерации, • генератор частоты регенерации в режиме MASTER, • блок формирования в режиме регенерации MASTER временной диаграммы сигналов BUSY и RFN, • программируемый контрольный регистр, определяющий параметры сигналов BUSY и RFN при регенерации в режиме MASTER, • счетчик однократных сбоев, • устройство формирования на выходе MERR микросхемы сигнала обнаружения в считываемом слове неисправимого сбоя кратности 2 или более. <p>2.3. Устройство управления регенерацией информации. Устройство управления использует или формирует внешние управляющие сигналы: EN_MASTER, BUSY, RFN, TEST0, TEST1, EC_BYPASS.</p>

этом внутренний объем памяти СОЗУ составляет 4,875 Мбит с организацией 131 072 слова по 39 бит.

Микросхема наряду с традиционными элементами содержит специальные элементы, выполняющие функцию исправления ОС, как показано в табл. 1.

Управление микросхемой осуществляется с использованием шести основных управляющих сигналов – EN_MASTER, RFN, BUSY, CEN, OEN, WEN, в соответствии с таблицами истинности 2 и 3. Три дополнительных управляющих сигнала EC_BYPASS, TEST0 и TEST1 используются для начальных установок регистров и счетчиков СОЗУ и для ее тестирования. Регенерация информации в обоих вариантах (вариант MASTER или вариант SLAVE) осуществляется периодически по одному из адресов, задаваемых внутренним счетчиком адреса, путем приостановки (прерывания) работы микросхемы в других режимах (записи или чтения). Интервалы времени, через которые выполняются циклы регенерации, устанавливаются в зависимости от интенсивности

воздействующего на микросхему потока частиц. Различие вариантов регенерации MASTER или SLAVE состоит в том, откуда формируется команда на пре-

Таблица 2. Таблица истинности микросхемы в режимах регенерации или чтения, записи и хранения

Логическое состояние вывода			Режим регенерации	Режим микросхемы
EN_MASTER	RFN	BUSY		
H	L (выход)	L	MASTER	Регенерация
L	L (вход)	hiZ	SLAVE	Регенерация
H	H (выход)	L	MASTER	Чтение, запись или хранение (табл. 3)
L	H (вход)	hiZ	SLAVE	

Примечание: TEST0=TEST1=EC_BYPASS=0.

Таблица 3. Таблица истинности в режимах чтения, записи и хранения

Логическое состояние вывода				Режим микросхемы
CEN	OEN	WEN	DQ0-DQ31	
H	X	X	hiZ	Хранение данных
L	H	H	hiZ	Считывание данных в выходной буфер
L	L	H	Выходные данные	Считывание данных
L	X	L	Входные данные	Запись данных

Примечание: TEST0 = TEST1 = EC_BYPASS = 0.

рывание и выполнение цикла регенерации по очередному адресу: из самой микросхемы в варианте MASTER или извне в варианте SLAVE.

КРИТЕРИЙ СООТВЕТСТВИЯ СОЗУ ТРЕБОВАНИЮ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ

Для микросхем СОЗУ с встроенной функцией исправления ОС необходимо определить количественный критерий, на соответствие которому в процессе испытаний проверяется их сбоеустойчивость. Критерий сбоеустойчивости не должен зависеть от условий испытаний (плотности потока частиц, частоты регенерации, длительности облучения, типа ионов), что позволит распространять результат испытаний на реальные условия применения. Микросхемы, соответствующие такому критерию, признаются сбоеустойчивыми.

В [5] представлен подход, в соответствии с которым при фиксированной плотности потока частиц (G) экспериментально определяемое количество МС ($M_{сэ}$), возникающих в микросхеме, регенерируемой с периодом T_r в течение времени испытания T_s , сравнивается с оценочным количеством МС ($M_{сп}$), которое принимается равным количеству ОС m , возникающих в микросхеме за время одного периода регенерации T_r . В случае $M_{сэ} < M_{сп} = m$ микросхема признается нечувствительной к эффектам МС, в противном случае – чувствительной к эффектам МС. Вышеприведенное граничное соотношение зависит от условий эксперимента, поэтому не может быть использовано в качестве критерия сбоеустойчивости.

Соотношением, не зависящим от условий эксперимента, которое может быть определено в качестве критерия сбоеустойчивости, является равенство с заданной погрешностью экспериментально определяемого количества МС, возникающих в микросхеме, регенерируемой с периодом T_r в течение времени испытания T_s , расчетному количеству МС, определяемому выражением (5).

В микросхемах, удовлетворяющих такому критерию сбоеустойчивости, для получения в условиях эксплуатации расчетного значения частоты МС расчетное значение периода регенерации должно быть уменьшено на величину относительной погрешности, заданной в процессе испытаний.

Минимальной относительной погрешности между расчетом и экспериментом соответствуют следующие важные особенности методики определения исходных экспериментальных данных и выполнения расчетов.

1. Экспериментальное количество МС должно определяться по формируемому микросхемой признаку MERR ошибки кратности 2 или более.
2. Значение сечения ОС, экспериментально определяемое только для информационных разрядов микросхемы, для выполнения расчетов должно быть приведено к сечению ОС микросхемы с учетом и информационных, и контрольных разрядов.
3. Расчетное среднее количество МС должно определяться с использованием уточненных выражений (4) и (5).

Применение предложенного критерия сбоеустойчивости для обработки результатов испытаний СОЗУ 4 Мбит приведено в следующем разделе статьи.

ИСПЫТАНИЯ СОЗУ НА СБОЕУСТОЙЧИВОСТЬ

Экспериментальные данные испытаний СОЗУ4М на сбоеустойчивость получены «ЭНПО СПЭЛС» с использованием испытательного стенда на базе циклотрона У-400 (лаборатория ядерных реакций ОИЯИ, г. Дубна Московской обл.). Испытания проводились путем воздействия на микросхему потока ионов ксенона (Xe) и криптона (Kr) с различными значениями линейных потерь энергии (ЛПЭ). Испытания не выявили сбоев, являющихся следствием нарушения адресации информационных слов или других типов сбоев в периферийных схемах управления, все выявленные сбои диагностированы как сбои в ячейках памяти. Экспериментальные результаты облучения микросхем в режимах регенерации MASTER и SLAVE, а также результаты расчетов, выполненные с использованием модели (5), представлены в табл. 4. В столбцах 7 и 8 табл. 4 приведено количество двукратных сбоев, зафиксированных в словах данных экспериментально ($M_{сэ}$), и значение ($M_{сп}$), рассчитанное с использованием выражения (5). В столбце 9 приведена относительная погрешность П2 экспериментально определенного количества двукратных сбоев $M_{сэ}$ относительно расчетного количества $M_{сп}$. Знак «минус» в значении П2 означает, что экспериментальное количество двукратных сбоев больше расчетного, а знак «плюс» – расчетное больше экспериментального.

Представленные в табл. 4 экспериментальные результаты определялись с максимально возможной точностью. При подсчете количества МС сбои диагностировались во всех 39 разрядах каждого слова

Таблица 4. Количество двукратных сбоев, определенное экспериментально ($M_{сэ}$), и расчетное количество двукратных сбоев ($M_{сп}$) при воздействии на СОЗУ частиц с различными значениями параметров потока частиц (V , G , ЛПЭ) и периода регенерации информации T_r

Номер сеанса, образца	ЛПЭ	σ	V	G	T_r	$M_{сэ}$	$M_{сп}$	П2 $(M_{сп}-M_{сэ})/M_{сп}$
	МэВ·см ² /мг	0,01 см ²	10 ⁵ см ⁻²	1000 см ⁻² с ⁻¹	с	ед	ед	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ион Хе, Режим регенерации MASTER								
1.6	69	5,11	0,17	0,3	57	3	2,9	-0,03
2.6	69	5,11	0,17	0,8	21,2	3	2,9	-0,03
18.6	69	5,11	2,7	1,4	1,77	5	6,6	+0,24
19.6	69	5,11	2,7	1,5	1,77	7	7,1	+0,01
20.6	69	5,11	1,2	1,5	56,4	79	102	+0,23
3.5	98	5,86	0,16	0,5	32	4	3,4	-0,18
5.5	98	5,86	0,13	0,5	26	4	2,21	-0,81
6.8	98	6,65	2,2	5	44	665	816	+0,19
17.8	98	6,65	21	10	0,11	41	39	-0,05
Ион Хе, Режим регенерации SLAVE								
38.6	69	5,11	1,4	1,5	27,9	35	57	+0,33
38.6	69	5,11	1,4	0,8	8,4	13	9,35	-0,39
38.6	69	5,11	1,4	1,5	2,9	9	6	-0,5
38.6	69	5,11	0,88	1,5	0,39	4	0,5	-7
38.6	69	5,11	1,3	1,5	0,39	4	0,72	-4,55
38.6	69	5,11	0,88	0,8	27,9	14	19,7	+0,29
40.8	98	6,65	2,1	5,1	8,4	109	148	+0,26
40.8	98	6,65	5,6	10,0	0,39	59	36,8	-0,6
Ион Кг, режим регенерации MASTER								
5.10	41	2,9	2,6	4	65	197	217	+0,09
1.10	41	2,9	1,5	4	37,5	51	72	+0,29
2.10	41	2,9	2,6	4	65	188	217	+0,13
3.10	41	2,9	0,98	2	49	20	31	+0,35
7.10	41	2,9	13,2	2	0,111	2	0,8	-1,5
9.10	41	2,9	2,1	4	0,111	1	0,28	-2,57
14.10	41	2,9	10	4	1,77	20	23	+0,13
15.10	41	2,9	10	4	112	1096	1436	+0,24
16.10	41	2,9	9,2	4	0,111	1	1,2	+0,17

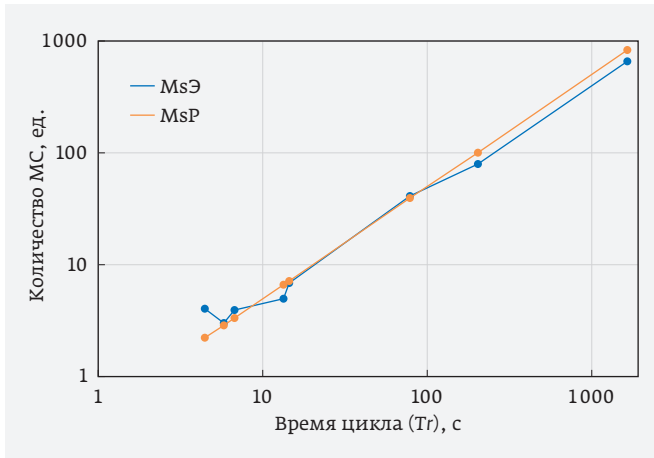


Рис. 1. Ион Хе, режим регенерации – MASTER, $\sigma=0,051 \text{ см}^2$, $G=500 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, $V=1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$

по наличию на выходе микросхемы MERR сигнала МС. Сечение сбоя определялось индивидуально для каждой испытываемой микросхемы и приводилось к полной информационной емкости микросхемы, включая контрольные разряды.

Количество двукратных сбоев M_s в конкретной микросхеме СОЗУ определяется сочетанием четырех параметров σ , V , G и T_r (5). При одинаковых значениях σ , V и G количество двукратных сбоев M_s из функции четырех параметров превращается в функцию одного параметра – периода регенерации T_r – и при $T_1 \ll T_r$ может быть наглядно представлено графически в виде прямой линии.

Результаты расчетов и экспериментов (табл. 4), полученные для различных значений параметров σ , V и G , преобразованы к графически наглядному

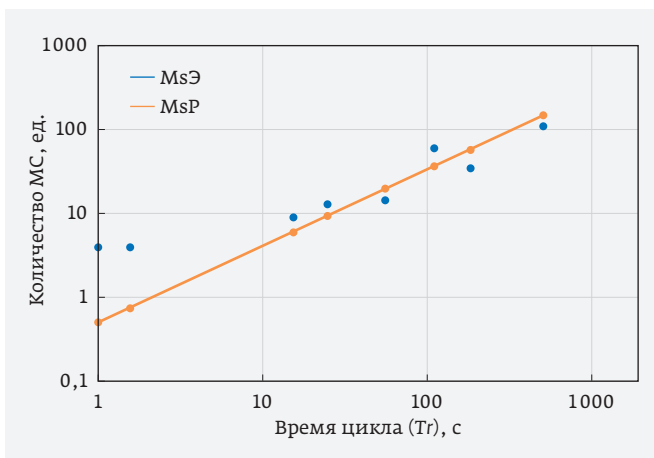


Рис. 2. Ион Хе, режим регенерации – SLAVE, $\sigma=0,051 \text{ см}^2$, $G=500 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, $V=1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$

представлению (с одинаковыми значениями параметров σ , V и G) количества сбоев M_s от периода регенерации T_r таким образом, чтобы произведение $VG\sigma^2 T_r$ в выражении (5) оставалось неизменным, то есть все различия этих трех параметров перенесены в параметр T_r .

Приведенные к одинаковым значениям σ , V и G и представленные в графическом виде экспериментальные ($M_{sЭ}$) и расчетные (M_{sP}) зависимости количества двукратных сбоев M_s от периода регенерации T_r (при $T_1 \ll T_r$) для ионов ксенона и для ионов криптона представлены на рис. 1-3.

Приведенные в табл. 4 и на рис. 1-3 результаты подтверждают соответствие испытываемой микросхемы СОЗУ требованию сбоеустойчивости по критерию равенства с заданной погрешностью экспериментальных и расчетных значений количества МС.

Погрешность П2 (столбец 9 табл. 4) экспериментально определенного количества двукратных сбоев $M_{sЭ}$ относительно расчетного количества M_{sP} для большинства значений не превышает десятков и даже единиц процентов, что свидетельствует о высокой точности модели и методики ее применения. Используемые уточненные соотношения для количества МС и методика их применения, обеспечивающие минимальное расхождение данных расчета и эксперимента создают эффективный инструмент для исследования источников погрешности эксперимента и аномальных значений экспериментальных данных.

Выяснение источников погрешности между расчетом и экспериментом связано с погрешностью определения параметров в выражении (5). Напри-

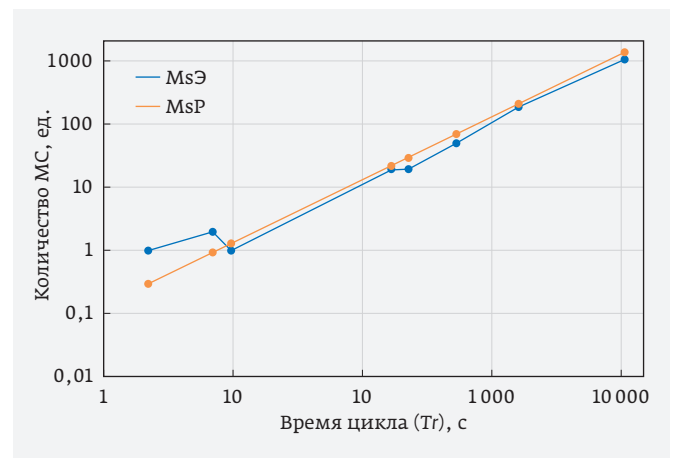


Рис. 3. Ион Кр, режим регенерации – MASTER, $\sigma=0,029 \text{ см}^2$, $G=500 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, $V=0,85 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$

мер, погрешность определения сечения сбоя с доверительной вероятностью 50% характеризуется нижней и верхней границами доверительного интервала, отличающимися в 1,2 раза. Это, в соответствии с (5), означает, что значения M_s только за счет погрешности определения сечения сбоя могут различаться в 1,44 раза.

Погрешность между результатами эксперимента и расчета может быть связана со статистическим характером процесса, с возможной неравномерностью плотности потока частиц во времени или по облучаемой поверхности.

В общем случае отклонение отдельных экспериментальных результатов от модельных может свидетельствовать о погрешности или ошибках эксперимента, либо об аномальном поведении микросхемы, которое требует отдельного изучения.

Выражение (5) предсказывает, что, например, для параметров процесса облучения, приведенных под рис. 1, при времени цикла регенерации информации по адресам всех N слов $T_r \leq T_1 = 0,04$ с, в микросхеме не возникнут двукратные МС, поскольку каждый ОС будет восстановлен до того, как в микросхеме произойдет второй ОС. Такому отсутствию МС в условиях эксперимента при плотности потока частиц $G = 500$ см⁻² и $\sigma = 0,051$ см² соответствует период регенерации информации по каждому отдельному адресу микросхемы, равный $T_1/N = 300$ нс.

В соответствии с (5), сбоеустойчивость СОЗУ в виде количества МС (M_s) имеет одно и то же значение при любых сочетаниях определяющих ее параметров σ^2 , V , G и T_r , в случае, если их произведение является постоянной величиной. Поэтому, учитывая, что $V = G \cdot T_s$, результаты испытаний, выполненных за короткое время тестирования T_s при больших значениях плотности потока частиц G и малом значении периода регенерации T_r можно распространить на реальные условия эксплуатации, в которых значения плотности потока частиц G на много порядков ниже.

Например, результаты испытаний на воздействие ионов ксенона с ЛПЭ 98 МэВ·см²/мг и $G = 10\,000$ см⁻²с⁻¹, приведенные в табл. 4, выполнение которых до значения флюенса $V = 2,1 \cdot 10^6$ см⁻² заняло менее 4 мин, допустимо использовать для расчета сбоеустойчивости микросхемы в реальных условиях эксплуатации, с плотностью потока частиц на много порядков меньше, при которых флюенс такой величины будет набираться годы.

МЕТОДИКА ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАННОЙ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ СОЗУ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЧАСТИЦ

Микросхемы памяти в космическом аппарате находятся под воздействием изменяющихся во времени спектрального состава и плотности потока частиц. Для поддержания в этих условиях заданной сбоеустойчивости СОЗУ в виде допустимого количества неисправляемых многократных сбоях M_s за определенный промежуток времени T_s вслед за каждым изменением плотности потока частиц G необходимо пересчитывать и изменять длительность периода регенерации T_r . Решение задачи упрощается при использовании в качестве следящей системы самой микросхемы СОЗУ на основе нижеприведенных соотношений:

$$m = 1 + \left(\frac{2N}{\sigma T_s} \right) * \left(\frac{M_s}{G} \right), \quad (7)$$

$$G = \frac{m}{\sigma T_r}, \quad (8)$$

$$T_r = \frac{T_s}{2M_s N} m(m-1). \quad (9)$$

С использованием соотношений (7–9) разработан алгоритм поддержания в течение времени T_s заданной сбоеустойчивости M_s , который работает следующим образом:

1. Использование микросхемы начинается с расчетными значениями параметров $m = m_0$ и $T_r = T_{r0}$, соответствующими требуемому значению сбоеустойчивости M_s в течение интервала времени T_s . Расчетное значение параметра m_0 определяется из выражения (7) для оценочного значения G и эквивалентного значения сечения сбоя σ , определенного на этапе испытаний СОЗУ. Расчетное значение T_{r0} определяется из (9).
2. В очередном цикле регенерации, выполняемом с текущим значением параметра T_r , производится подсчет фактического значения количества ОС m_1 .
3. Если определенное в п. 2 значение m_1 отличается от предыдущего значения параметра m , вычисляется расчетное количество ОС m_2 , которое необходимо поддерживать в течение периода регенерации, чтобы соответствовать заданному в п. 1 значению сбоеустойчивости M_s . Для вычислений используется получаемое из (7) и (8) нижеприведенное выражение:

$$m_2 = 1 + \frac{2NM_s T_r}{m_1 T_s}. \quad (10)$$

4. С помощью найденного в п. 3 значения m_2 , в (7) вычисляется новое значение периода регенерации T_{r2} , которое соответствует заданному в п. 1 значению сбоеустойчивости M_s .
 5. Значение периода регенерации T_{r2} присваивается параметру T_r , значение количества ОС m_2 присваивается параметру m , управление алгоритмом регенерации передается к п. 2.
- Блок-схема алгоритма приведена на рис. 4.

Алгоритм работает таким образом, что при поддержании заданного значения сбоеустойчивости увеличению выявленного за выполненный период регенерации количеству ОС соответствует уменьшение длительности следующего периода регенерации и наоборот.

Удобство алгоритма обусловлено тем, что он использует только единственный контролируемый в процессе эксплуатации параметр – количество одиночных сбоев за цикл регенерации и не использует такие неудобные для определения параметры для меняющейся во времени спектральной плотности ТЗЧ, как эффективное сечение сбоя и эффективная плотность потока частиц.

Для подсчета количества ОС за время периода регенерации в состав представленного выше пилотного образца СОЗУ был введен счетчик ОС, содержание которого можно периодически считывать.

ВРЕМЯ НЕДОСТУПНОСТИ МИКРОСХЕМЫ СОЗУ

Использование в микросхеме регенерации информации, в течение которой микросхема недоступна для записи и чтения, характеризуется временем недоступности. Время недоступности – относительная величина равная отношению времени, затрачиваемого на регенерацию информации по одному адресу к времени цикла регенерации информации t_r по одному адресу ($t_r = T_r / N$). Время регенерации информации по одному адресу для пилотного образца, на котором проводились исследования, составляет 100 нс.

Время цикла регенерации информации по одному адресу t_r определяется выражением:

$$t_r = \frac{2M_s}{G^2 \sigma^2 T_s} \cdot \quad (11)$$

При требуемом уровне сбоеустойчивости $M_s = 1$ сбой в течение интервала времени T_s , равного одному году, заведомо завышенных значениях эквивалентного сечения сбоя σ , равному сечению сбоя для ионов криптона с ЛПЭ 41 МэВ·см²/мг и значении эквивалентной плотности потока частиц

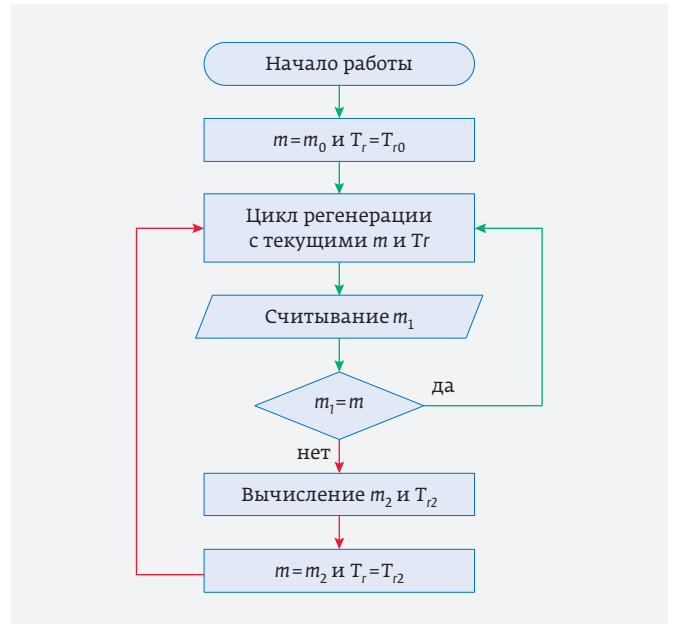


Рис. 4. Блок-схема алгоритма поддержания сбоеустойчивости

$G = 0,1 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, время цикла регенерации $t_r = 3500 \text{ мкс}$. При этом относительное время недоступности составит $0,1 / 3500 = 0,003\%$ – это величина, практически не влияющая на производительность системы.

В отсутствии регенерации (при $T_r = T_s$) за время $T_s = 1 \text{ год}$ при выбранных значениях параметров G и σ в микросхеме произошло бы количество сбоев $m = \sigma G T_s = 94000$ сбоев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении исследования сбоеустойчивости СОЗУ с функцией исправления одиночных сбоев при воздействии ТЗЧ получены следующие результаты:

1. Предложен критерий соответствия СОЗУ требованию сбоеустойчивости в виде равенства с заданной погрешностью экспериментальных и расчетных значений МС. Достоверность предложенного критерия обоснована теоретически и подтверждена результатами испытаний образцов СОЗУ 4 Мбит.
2. Использованные уточненные соотношения для расчета количества МС и методика их применения создают эффективный инструмент для исследования источников погрешности эксперимента (например, в виде неравномерности плотности потока частиц по времени и по облучаемой поверхности) и аномальных значений экспериментальных данных.

3. На основе соотношений, определяющих в явном виде зависимость количества МС от плотности потока частиц, обосновано распространение результатов испытаний, полученных при высоких значениях плотности потока частиц, на реальные условия применения.
4. Предложен алгоритм управления периодом регенерации, который обеспечивает в течение времени эксплуатации (T_s) поддержание заданного значения сбоеустойчивости (M_s), используя зависимость только от количества одиночных сбоев (m), регистрируемых за один период регенерации (T_r).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

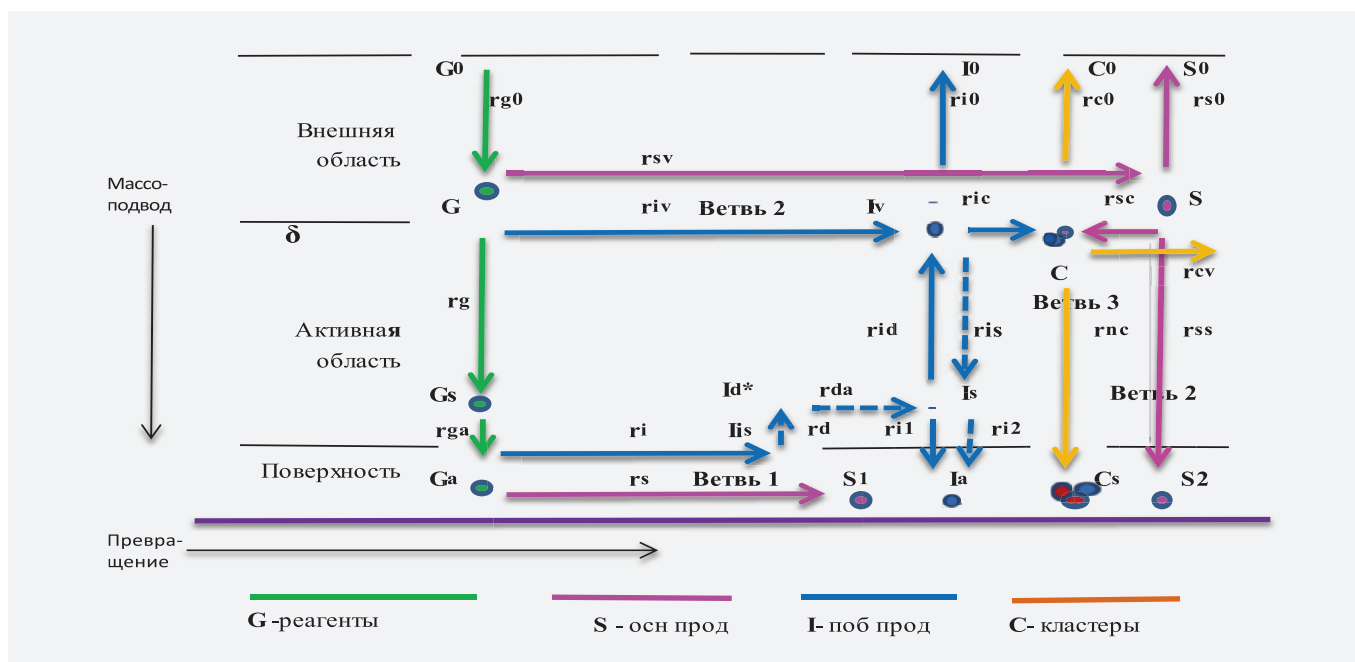
1. **Hafer C., Mabra J., Slocum D., Kalkur T.S.** Next Generation Radiation-Hardened SRAM for Space Applications. Aerospace Conference, 2006 IEEE.

2. **Hafer C., Mabra J., Slocum D., Farris T., Jordan A.** SEE and TID Results for a RadHard-by-Design 16Mbit SRAM with Embedded EDAC. Radiation Effects Data Workshop, 2006 IEEE.
3. **Мещанов В.Д., Лушников А.С., Рыбалко Е.С., Фомичева Н.Н.** Модель сбоеустойчивости СОЗУ с функцией исправления одиночных сбоев при воздействии тяжелых заряженных частиц // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. Вып. 2 (162).
4. **Петров К.А., Стенин В.Я.** Помехоустойчивое кодирование в КМОП ОЗУ, устойчивых к одиночным воздействиям ядерных частиц // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. № 5. С. 359–367.
5. **Боруздина А.Б., Темирбулатов М.С., Печенкин А.А., Уланова А.В., Яшанин И.Б., Эннс В.И., Яненко А.В., Чумаков А.И.** Особенности экспериментальных методов исследования микросхем памяти с помехоустойчивым кодированием данных // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС), Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Зеленоград). 2016. № 4.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В прошлом номере нашего журнала (Выпуск 4 (168) от 2017 года) по техническим причинам в статье В.Л.Евдокимова «Молекулярно-кинетическая модель процесса осаждения слоев из газовой фазы» на с. 43

(рис. 1. Кинетическая схема стадий процесса осаждения в пограничном газовом слое) был допущен ряд опечаток. Редакция журнала приносит извинения. Правильный вариант рисунка представлен ниже.



ПЛАНАРНЫЙ КНИ БЕСПЕРЕХОДНОЙ МОП-ТРАНЗИСТОР

Беспереходные МОП-транзисторы (МОП БПТ) обладают рядом преимуществ перед традиционными с точки зрения простоты конструкции, технологии изготовления и снижения влияния короткоканальных эффектов на характеристики прибора. Однако известные экспериментальные нанопроволочные МОП БПТ, из-за возникновения паразитного биполярного транзистора в закрытом состоянии, имеют высокие подпороговые токи. С целью решения этой проблемы в данной работе представлены структурная модель планарного КНИ МОП БПТ по нормам технологии 90 нм, маршрут математического моделирования и с использованием приборно-технологического моделирования в среде TCAD исследовано влияние расположения контактов сток / истоковых областей и концентрации примеси в пленке кремния КНИ МОП БПТ на пороговое напряжение, токи насыщения и подпороговые токи. В результате исследования обнаружен и объяснен новый короткоканальный эффект. Он проявляется под влиянием ОПЗ n-n-перехода между контактом и стоком на зарядовое состояние области канала, когда расстояние между электродом затвора и контактом становится меньше 100 нм. Показано, что при формировании планарных беспереходных КНИ МОП-транзисторов по технологии 90 нм необходимо создавать сток-истоковые области размером 250 нм и задавать концентрацию в пленке в n-канальном транзисторе – $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и в p-канальном – $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что позволяет снизить подпороговые токи прибора до величины 10–13 А / мкм и иметь соотношение токов в открытом и закрытом состоянии 10^8 . Разработан маршрут изготовления КНИ КМОП-структуры на основе БПТ, который соответствует стандартному маршруту изготовления КНИ КМОП ИС с технологической нормой 90 нм, за исключением таких операций, как формирование первого слейсера (осаждение ТЭОС и нитрида кремния) и создания областей LDD, Halo и Pocket (три ионные имплантации, одна из них под углом).

Ключевые слова: беспереходный транзистор, пороговое напряжение, подпороговый ток, ток насыщения, сток-истоковые контакты, межзонное туннелирование

Сведения об авторах:

Королев Михаил Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: mikor33@icloud.com;

Чаплыгин Юрий Александрович, доктор технических наук, академик Российской академии наук, президент Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: president@miet.ru;

Ключников Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12, строение 1, e-mail: aklyuchnikov@mikron.ru;

Ефимова Дарья Игоревна, магистр, стажер-исследователь кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: ef_dasha@mail.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КОМБИНАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

В настоящее время актуальность исследований в области повышения надежности функционирования микросистемных систем неуклонно возрастает. Во многом это связано с непрекращающейся миниатюризацией, приводящей к снижению порога воздействия, достаточного для возникновения сбоев и отказов. Статья посвящена актуальной проблеме построения схем функционального контроля, обнаруживающих ошибки. Исследуются различные помехоустойчивые коды (код повторения, Бергера, Хемминга и Голая) с точки зрения применимости их к задаче построения контролепригодных логических устройств. В статье рассматриваются различные аспекты аппаратной реализации схем функционального контроля, а также вопросы разработки средств автоматизации проектирования. На большом наборе контрольных комбинационных схем исследована эффективность помехоустойчивых кодов с точки зрения структурных затрат и обнаруживающей способности.

Ключевые слова: сбоеустойчивость, функциональный контроль, комбинационные схемы, логическое маскирование, разделимые коды, схема дублирования, код Бергера, код Хемминга, код Голая, обнаруживающая способность, структурная избыточность, инжентирование ошибок

Сведения об авторах:

Дмитрий Владимирович Тельпухов, кандидат технических наук, руководитель отдела методологии проектирования интегральных схем, Институт проблем проектирования в микроэлектронике, 124365, Москва, Зеленоград, ул. Советская, дом 3, e-mail: nofrost@inbox.ru

Деменева Елена Игоревна, инженер-исследователь отдела методологии проектирования интегральных схем, Институт проблем проектирования в микроэлектронике, 124365, Москва, Зеленоград, ул. Советская, дом 3, e-mail: alena_demeneva@bk.ru

Жукова Татьяна Дмитриевна, инженер-исследователь отдела систем автоматизированного проектирования интегральных схем, Институт проблем проектирования в микроэлектронике, 124365, Москва, Зеленоград, ул. Советская, дом 3, e-mail: zhukova_t@ippm.ru

Хрущев Никита Сергеевич, стажер-исследователь отдела методологии проектирования интегральных схем, Институт проблем проектирования в микроэлектронике, 124365, Москва, Зеленоград, ул. Советская, дом 3, e-mail: nilk68@ya.ru

PLANAR SOI JUNCTIONLESS MOSFET

Junctionless MOSFETs have a number of advantages over traditional ones in terms of simplicity of design, manufacturing technology and reducing the impact of short-channel effects on the device characteristics. However, the known experimental nanowire MOSFETs have high subthreshold currents due to the parasitic bipolar transistor appearance in the closed state. In order to solve this problem, a structural model of a planar SOI in accordance with the technology standards of 90 nm, the route of mathematical modeling have been developed. Also with the use of the TCAD environment the influence of the impurity concentration in the SOI MOSFET silicon film on the threshold voltage, saturation currents and subthreshold currents have been analyzed. As a result of the research a new short-drain effect was discovered and explained. It manifests itself under the influence of the SCR of the n-n transition between the contact and the drain on the channel region charge state as the distance between the gate electrode and the contact becomes less than 100 nm. It is shown that in the formation of planar junctionless MOSFETs with 90 nm technology, it is necessary to create drain-source regions with a size of 250 nm and to specify the concentration in the film in an n-channel transistor – $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and in a p-channel transistor – $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, which allows reducing subthreshold currents of the device up to 10–13 A / μm and have a current ratio in the open and closed state 10^8 . A route for manufacturing a SOI CMOS structure based on the JLT has been developed. It corresponds to the standard route for the SOI CMOS IC production with a 90 nm technological norm, except such operations as the formation of the first spacer (precipitation of TEOS and silicon nitride) and creation of LDD, Halo and Pocket regions (three ion implantations, one of them at an angle).

Keywords: junctionless transistor, threshold voltage, subthreshold current, saturation current, drain-source contacts, interband tunneling

Data of authors:

Korolev Mikhail Aleksandrovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Integrated Electronics and Microsystems of the National Research University of Electronic Technology (MIET), etc. 1, pl. Shokina, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia, e-mail: mikor33@icloud.com;

Chaplygin Yuriy Aleksandrovich, Doctor of Engineering Sciences, a full member of the Russian Academy of Sciences, the President of the National Research University of Electronic Technology (MIET), etc. 1, pl. Shokina, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia, e-mail: president@miet.ru;

Klyuchnikov Alexey Sergeevich, candidate of Engineering Sciences, head of laboratory, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, d.12 / 1, 1-st Zapadnyy proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: aklyuchnikov@mikron.ru;

Efimova Darya Igorevna, master, trainee-researcher of the Department of Integral Electronics and Microsystems of the National Research University of Electronic Technology (MIET), etc. 1, pl. Shokina, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia, e-mail: ef_dasha@mail.ru.

THE RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AUTOMATION SYSTEMS FOR THE CONCURRENT ERROR DETECTION COMBINATIONAL CIRCUITS

Today, the urgent task is to increase the reliability of microelectronic systems. In many ways it is connected with permanent miniaturization that leads to decreasing of a threshold of impact which is sufficient for the occurrence of failures. The article is devoted to the actual problem of constructing concurrent error detection schemes. Different error detection codes are investigated (repetition code, Berger, Hamming and Golay) from the point of view of their applicability to the problem of creating CED schemes. Various aspects of a hardware implementation of CED schemes and development of design automation tools are considered in the article. The effectiveness of error detection codes has been investigated on a large set of benchmark schemes in terms of structural costs and vulnerability.

Keywords: concurrent error detection (CED), fault tolerance, reliability, combinational circuits, logic masking, duplication, Berger code, Hamming code, Goley code, hardware redundancy, vulnerability

Data of authors:

Telpukhov Dmitriy Vladimirovich, candidate of Technical Science, Head of the department of integrated circuits design methodology, Institute for design problems in microelectronics of Russian Academy of Science, Sovetskaya st., 3, Zelenograd, Moscow, Russia, 124365, e-mail: nofrost@inbox.ru

Demeneva Alena Igorevna, Research engineer, Institute for design problems in microelectronics of Russian Academy of Science, Sovetskaya st., 3, Zelenograd, Moscow, Russia, 124365, e-mail: alena_demeneva@bk.ru

Zhukova Tatyana Dmitrievna, Research engineer, Institute for design problems in microelectronics of Russian Academy of Science, Sovetskaya st., 3, Zelenograd, Moscow, Russia, 124365, e-mail: zhukova_t@ippm.ru

Khrushchev Nikita Sergeevich, Trainee, Institute for design problems in microelectronics of Russian Academy of Science, Sovetskaya st., 3, Zelenograd, Moscow, Russia, 124365, e-mail: nilk68@ya.ru

МЕМРИСТИВНЫЕ ДВУМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ – НОВЫЙ ТИП ЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ И ПАМЯТИ

Представлен обзор новых резистивных переключателей и памяти на основе атомарных двумерных кристаллов. Особое внимание уделено концепции самоорганизованных синапсодобных мемристивных систем для информационных устройств и нейроморфных вычислений. Рассмотрен новый тип мемристора с фотозатвором, управляемый электрически и оптически в широком диапазоне длин волн, который может быть использован для решения большого круга задач, связанных с обработкой изображений, распознаванием образов, звуков, движений, речи, необходимых для создания искусственного интеллекта.

Ключевые слова: мемристор, резистивная память, графен, двумерные кристаллы, фоторезистивное переключение

Сведения об авторах:

Панин Геннадий Николаевич; кандидат физико-математических наук, профессор; Институт проблем технологии микроэлектроники Российской академии наук, 142432, Московская обл., Ногинский р-н, Чернозоловка, Институтская ул., д. 6; Исследовательский Центр квантово-функциональных полупроводников, Академия нанотехнологий, Университет Донггук, 100-715, Сеул, Южная Корея

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ САМОСОВМЕЩЕННОГО ПАТТЕРНИРОВАНИЯ В ИММЕРСИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ

Мультипаттернирование позволило продолжить масштабирование технологии чипов до нормы 28 нм и далее. Самосовмещенное двойное паттернирование (SADP) и самосовмещенное четырехкратное паттернирование (SAQP), а также итерации Litho-Etch / Litho-Etch (LELE) широко используются в полупроводниковой индустрии, так как это позволяет формировать структуры с суб-193нм-литографическими размерами для таких слоев, как FIN, затворы и критические слои металлизации [1]. Однако при мультипаттернировании увеличивается сложность маршрута, а также возрастают случайные ошибки положения края, зависящие в том числе от точности совмещения.

В статье рассматриваются методы мультипаттернирования для формирования линий и контактных окон, их преимущества и недостатки, а также способы уменьшения ошибок положения края, в том числе за счет применения самосовмещенных методов.

Ключевые слова: мультипаттернирование, ошибка положения края, самосовмещенные методы, подрезание, блокирование

Сведения об авторах:

Красников Геннадий Яковлевич, доктор технических наук, академик Российской академии наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: gkrasnikov@niime.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@niime.ru;

Литаврин Михаил Владимирович, Московский физико-технический институт (Государственный университет), 141701 Россия, г. Долгопрудный, Институтский переулок д. 9; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: mlitavrin@niime.ru;

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

ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОЙ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МОРФОЛОГИЮ И АВТОЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Исследовано влияние плазмохимической модификации поверхности на автоэмиссионные свойства кристаллов кремния. Показано, что травление пластин кремния в высокоионизированной микроволновой плазме с использованием хладона-14 позволяет управлять в широких пределах порогом напряженности электрического поля и максимальными плотностями автоэмиссионных токов. Рассмотрены физико-химические механизмы, ответственные за модификацию поверхности и автоэмиссионные характеристики кристаллов кремния.

Ключевые слова: полевая эмиссия электронов, морфология, кремний, модификация поверхности

Сведения об авторах:

Яфаров Равиль Кышшафович, доктор технических наук, профессор, заведующей лабораторией «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 410019, Россия, г. Саратов, ул. Зеленая, 38, e-mail: rirpc@yandex.ru;

Шаныгин Виталий Яковлевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 410019, Россия, г. Саратов, ул. Зеленая, 38, e-mail: vitairerun@mail.ru.

MEMRISTIVE ELECTRONIC SYSTEMS – A NEW TYPE OF ELECTRONIC LOGIC SWITCHES AND MEMORY

An overview of new resistive switches and memory based on atomic two-dimensional crystals is presented. Particular attention is paid to the concept of self-organized synapse-like memristive systems for information devices and neuromorphic computations. A new type of memristor with a photogate, controlled electrically and optically over a wide range of wavelengths, can be used to solve a wide range of tasks related to image processing, image recognition, sounds, movements and speech recognition needed to create artificial intelligence.

Keywords: memristor, resistive memory, graphene, two-dimensional crystals, photoresistive switching

Data of authors:

Panin Gennady Nikolaevich; candidate of physical and mathematical Sciences, Professor; Institute of Microelectronics Technology, the Russian Academy of Sciences, Russia, 6, Institutskaya st., Chernogolovka, Noginsk Distr., Moscow Region, 142432, Quantum-Functional Semiconductors Research Center, Academy of Nano-Information Technologies, Dongguk University, 100-715, Seoul, South Korea

SOME ASPECTS OF SELF-ALIGNED MULTIPATTERNING IN IMMERSION LITHOGRAPHY

Multipatterning has enabled continued scaling of chip technology at the 28 nm node and beyond. Self-aligned double patterning (SADP) and self-aligned quadruple patterning (SAQP) as well as LithoEtch / Litho-Etch (LELE) iterations are widely used in the semiconductor industry to enable patterning at sub 193 immersion lithography resolutions for layers such as FIN, Gate and critical Metal lines [1]. However, multipatterning increases process complexity as well as EPE variations, which depend on overlay including.

In this paper we review multipatterning methods for line / space and contact holes formation, their advantages and disadvantages and also ways to decrease EPE variation, self-aligned techniques including.

Keywords: multipatterning, EPE, self-alignment, cutting, blocking

Data of authors:

Krasnikov Gennady Yakovlevich, doctor of Engineering Sciences, academician of Russian Academy of Sciences, Full Professor, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 12 / 1, 1-y Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: gkrasnikov@niime.ru; Gushchin Oleg Pavlovich, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 12 / 1, 1-y Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: ogushin@niime.ru.

Litavrin Michail Vladimirovich, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 141701, Russia, Dolgoprudny, Institutskiy per., 9, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 12 / 1, 1-y Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: mlitavrin@niime.ru;

Gornev Evgeny Sergeevich, doctor of Engineering Sciences, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 12 / 1, 1-y Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: egornev@niime.ru

INFLUENCE OF MICROWAVE PLASMA-CHEMICAL PROCESSING ON MORPHOLOGY AND FIELD EMISSION PROPERTIES OF CRYSTALS OF SILICON

Influence of plasma-chemical modification of a surface on field emission properties of crystals of silicon is investigated. It is shown, that etching of plates of silicon in high-ionized microwave plasma with use of freon-14 allows operating over a wide range a threshold of electric field strength and the maximum density of field emission currents. Are considered physics – chemical mechanisms responsible for modification of a surface and field emission characteristics of crystals of silicon.

Keywords: field emission of electrons, morphology, silicon, modification of a surface

Data of authors:

Yafarov Ravil Kyashshafovich, Doctor of Engineering Sciences, Head of laboratory of Submicron electron ion technology, Saratov branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Zelenaya St., 38, Saratov, Russia, 410019, e-mail: rirpc@yandex.ru;

Shanygin Vitaliy Yakovlevich: Candidate of Engineering Sciences, research associate of laboratory of Submicron electron ion technology, Saratov branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Zelenaya St., 38, Saratov, Russia, 410019, e-mail: vitairerun@mail.ru

ЭФФЕКТИВНЫЕ УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ С НИТЕВИДНЫМИ ПОРАМИ, ЗАПОЛНЕННЫМИ ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДОМ

Решается задача численного моделирования эффективных упругих характеристик композитов типа нановолокна поливинилиденфторида в матрице анодного оксида алюминия. Исследованы зависимости компонент тензора эффективных модулей упругости и коэффициентов упругой анизотропии от параметра структуры композитов, связанного с концентрацией волокон.

Ключевые слова: анодный оксид алюминия, поливинилиденфторид, матричный композит, эффективные модули упругости, анизотропия, моделирование

Сведения об авторах:

Красников Геннадий Яковлевич, доктор технических наук, академик Российской академии наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: gkrasnikov@niime.ru;

Бардушкин Владимир Валентинович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедр «Высшая математика № 2» и «Системная среда качества» МИЭТ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: bardushkin@mail.ru;

Карташов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, e-mail: dmitry.kartashov@mail.ru;

Кочетыгов Андрей Александрович, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ, e-mail: aakcht@gmail.com;

Шилыева Юлия Игоревна, кандидат химических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: shilyaeva@gmail.com;

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

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОФИЛЕЙ ИСПАРЕНИЯ МИКРОКАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ С ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Решена стандартная задача теплопроводности применительно к испарению капель летучих соединений с поверхности однородного изотропного стержня с теплоизолированными боковыми стенками. Получено выражение для профиля охлаждения стержня по глубине, отражающее его зависимость от времени с начала испарения и до его окончания. Выражение применено к испарению микрокапли этилового спирта с поверхности плавленого кварца. Результаты работы являются основой для разработки нового экспериментального метода исследования жидкостей.

Ключевые слова: микрокапля, испарение, твердотельный стержень, акустическая волна, теплопроводность

Сведения об авторах:

Анисимкин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, e-mail: anis@cplire.ru;

Верона Энрико, доктор физико-математических наук, Институт фотоники и нанотехнологий Национального Совета Научных Исследований Италии, ViaCineto, 42-1-00156, Roma, Italy; e-mail: veronaenrico@gmail.com;

Воронова Наталья Владимировна, аспирант института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Элап», 124460, Москва, Зеленоград, Панфиловский просп., 10, e-mail: vonavl@mail.ru.

EFFECTIVE ELASTIC CHARACTERISTICS OF THE ANODIC ALUMINA HAVING THREADLIKE PORES FILLED WITH POLYVINYLIDENE FLUORIDE

Numerical modeling of the effective elastic characteristics in the polyvinylidene fluoride-filled anodic alumina is carried out. Dependencies of tensor components of effective elastic modules and coefficients of elastic anisotropy on the parameter of composites structure, connected with concentration of polyvinylidene fluoride nanowires, are investigated.

Keywords: anodic alumina, polyvinylidene fluoride, matrix composite, effective elastic modules, anisotropy, modeling. **Keywords:** anodic aluminum oxide, polyvinylidene fluoride, matrix composite, thermoelastic properties, average stress, modelling

Data of authors:

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

Vladimir Valentinovich Bardushkin, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, docent, Professor departments of "Higher mathematics No. 2" and "System environment" quality MIET, "National Research University of Electronic Technology", Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: bardushkin@mail.ru;

Dmitrii Aleksandrovich Kartashov, Candidate of Engineering Sciences, docent, "Molecular Electronic Research Institute" Stock Company, National Research University of Electronic Technology, d. 12 / 1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: dmitry.kartashov@mail.ru;

Andrey Aleksandrovich Kochetygov, "National Research University of Electronic Technology", Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: aakcht@gmail.com;

Yuliya Igorevna Shilyaeva, Candidate of Chemical Sciences, "National Research University of Electronic Technology", Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: shilyaeva@gmail.com;

Viktor Borisovich Yakovlev, Professor of Russian Academy of Sciences, Doctor of Physico-Mathematical 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

THE TEMPERATURE PRO-FILE CALCULATION FOR MICRODROPLET EVAPORATION FROM SOLID ROD

The standard thermal-balance approach is used to study the process of microdroplet evaporation from the surface of thermally isolated solid rod. Expression for the rood cooling profile is derived as a function of time starting from the beginning to the end of the process. The expression is applied for ethyl alcohol microdroplet on fused quartz as an example. Results of the paper are considered as the background for developing new experimental method for liquid analysis.

Keywords: microdroplet, evaporation, solid rod, acoustic wave, thermal conductivity

Data of authors:

Anisimkin Vladimir Ivanovich, doctor of physical and mathematical Sciences, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy Of Sciences, Mokhovaya 11-7, Moscow, 125009, Russia, e-mail: anis@cplire.ru;

Verona Enrico, Institute for Photonics and Nanotechnologies, Italian Research Council IFN-CNR, Via Cineto, 42-1-00156, Roma, Italy; e-mail: veronaenrico@gmail.com;

Voronova Natalia Vladimirovna, graduate student of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy Of Sciences, "Scientific research Institute "ELPA", Stock Company, 10, 8с5, Panfilovskiyprospekt, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: vonavl@mail.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ СБЕОУСТОЙЧИВОСТИ СОЗУ С ФУНКЦИЕЙ ИСПРАВЛЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ СБОЕВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЗЧ

Представлены результаты исследования сбоеустойчивости СОЗУ с функцией исправления одиночных сбоев при воздействии ТЗЧ. Приведены модельные и экспериментальные зависимости сбоеустойчивости пилотных образцов СОЗУ емкостью 4 Мбит при воздействии ТЗЧ от частоты исправления информации. Показано соответствие модели и эксперимента.

Ключевые слова: СОЗУ, тяжелая заряженная частица, однократный сбой, многократный сбой, обнаружение и коррекция ошибок в СОЗУ

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@niime.ru;

Лушников Александр Сергеевич, Общество с ограниченной ответственностью «СИТРОНИКС-микродизайн», 124527, Россия, Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: sitmd88@smd-001.ru;

Мещанов Владимир Дмитриевич, кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «СИТРОНИКС-микродизайн», 124527, Россия, Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: sitmd11@smd-001.ru;

Рыбалко Егор Сергеевич, Общество с ограниченной ответственностью «СИТРОНИКС-микродизайн», 124527, Россия, Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: rybalko@smd-001.ru;

Фомичева Надежда Николаевна, Общество с ограниченной ответственностью «СИТРОНИКС-микродизайн», 124527, Россия, Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: fomicheva@smd-001.ru;

Шелепин Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1, e-mail: nshel@niime.ru.

STUDY OF THE FAULT TOLERANCE OF SRAM WITH THE FUNCTION OF CORRECTING SINGLE EVENT UPSETS CAUSED BY HEAVY IONS

The results of a study of the fault tolerance of SRAM with the function of correcting single event upsets caused by heavy ions are presented. The model and experimental dependencies of the fault tolerance of SRAM samples on the information correction frequency are shown. The correspondence between the model and the experiment is demonstrated.

Keywords: SRAM, heavy ion, single event upset (SEU), multiple bit upset (MBU), error detection and correction (EDAC) in SRAM

Data of authors:

Krasnikov Gennady Yakovlevich, academician of Russian Academy of Sciences, doctor of Engineering Sciences, Full Professor, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 12/1, 1-y Zapadnyy proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: gkrasnikov@niime.ru;

Lushnikov Aleksandr Sergeevich, "SITRONICS-microdesign" Limited Liability Company, 6, Solnechnaya alleya, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: sitmd88@smd-001.ru; Meschanov Vladimir Dmitrievich, candidate of Engineering Sciences, "SITRONICS-microdesign" Limited Liability Company, 6, Solnechnaya alleya, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: sitmd11@smd-001.ru;

Rybalko Egor Sergeevich, "SITRONICS-microdesign" Limited Liability Company, 6, Solnechnaya alleya, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: rybalko@smd-001.ru;

Fomicheva Nadezhda Nikolaevna, "SITRONICS-microdesign" Limited Liability Company, 6, Solnechnaya alleya, Zelenograd, Moscow, Russia, 124527, e-mail: fomicheva@smd-001.ru;

Shelepin Nikolay Alekseevich, doctor of Engineering Sciences, Full Professor, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 12/1, 1-y Zapadnyy proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: nshel@niime.ru.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА ©

Перерегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций 14 августа 2013 г., ПИ №ФС77-55092.

Журнал издается 4 раза в год с 1965 года. Подписано в печать 30.03.2018.

Отпечатано в типографии ООО «Красногорский полиграфический комбинат». Номер заказа Е-1314. ☒ 107140, г. Москва, 1-й Красносельский пер., д. 3, оф. 17.

Тираж 500 экз. Цена договорная.

© При перепечатке ссылка на журнал «ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА» обязательна. Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей. Рукописи рецензируются, но не возвращаются. Срок рассмотрения рукописей – 5 недель.

ИЗДАТЕЛЬ

АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»
☎ +7 495 234-01-10 ☎ +7 495 956-33-46
✉ journal@electronics.ru

Подготовлено АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»

КОРРЕКТОР: А. Лужкова

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВЕРСТКА: А. Небольсин