

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 2 (174) 2019

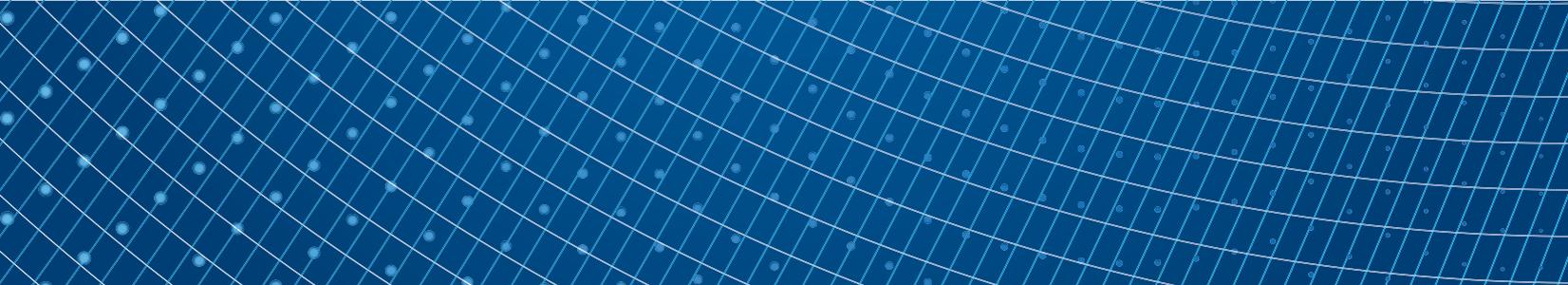
ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Issue 2 (174) 2019

Москва, 2019



**«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА.
Серия 3.
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА»**

**Редакционный совет
Главный редактор**

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

Члены редакционного совета

Асеев А. Л., академик РАН,
д. ф.-м. н.

Бетелин В. Б., академик РАН,
д. ф.-м. н.

Бокарев В. П., ответственный
секретарь, к. х. н.

Бугаев А. С., академик РАН,
д. ф.-м. н.

Быков В. А., д. т. н.

Галиев Г. Б., д. ф.-м. н.

Горбачевич А. А., член-
корреспондент РАН, д. ф.-м. н.

Горнев Е. С., зам. главного редак-
тора, д. т. н.

Грибов Б. Г., член-корреспондент
РАН, д. х. н.

Зайцев Н. А., д. т. н.

Ким А. К., к. т. н.

Критенко М. И., к. т. н.

Петричкович Я. Я., д. т. н.

Сигов А. С., академик РАН,
д. ф.-м. н.

Стемпковский А. Л., академик
РАН, д. т. н.

Чаплыгин Ю. А., академик РАН,
д. т. н.

Шелепин Н. А., зам. главного
редактора, д. т. н.

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 5

Физические явления

А. В. Белинский, М. Х. Шульман

Об использовании системы отсчета для «точечной»

модели фотона 6–10

Ф. И. Высикайло, В. С. Митин, А. А. Якушкин, В. И. Мащенко

Квантово-размерные эффекты при физическом легировании
нанокмполитов наноструктурами с большим средством

к электронам 11–25

Разработка и конструирование

Н. С. Данилин, Д. М. Димитров, И. Х. Сабиров

Микросистемы для бортового искусственного интеллекта 26–29

В. П. Тимошенко, А. И. Хлыбов, Д. В. Родионов, Н. А. Шелепин,

А. В. Селецкий

Исследование параметров транзисторов, изготовленных

по технологии КМОП КНИ, рефлектометрическим методом 30–35

Е. С. Шамин, Е. В. Ипатова, А. В. Кузовков, В. В. Иванов, Н. Н. Балан

Генерация Rule-Based SRAF для двумерных топологических

структур с учетом правил MRC: проблемы и решения 36–41

Процессы и технология

Е. С. Горнев

Промышленная технология микроэлектроники 42–53

Н. Н. Балан, В. В. Иванов, А. В. Кузовков, Е. С. Шамин

Место фазосдвигающих фотошаблонов в современной

полупроводниковой технологии 54–63

А. Ю. Павлов

Технология изготовления транзисторов с обеднением

и обогащением канала на нитриде галлия 64–71

Математическое моделирование

Р. А. Соловьев, И. А. Харитонов, Д. В. Тельпухов

Исследование методов повышения сбоеустойчивости

аппаратных реализаций свёрточных нейронных сетей 72–77

Аннотации 78–80

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,
Full Member of the RAS, Sc. D.

**The Members
of Editorial Council**

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

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

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

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

Bykov V. A., Sc. D.

Galiev G. B., Sc. D.

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

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

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

Zaitsev N. A., Sc. D.

Kim A. K., Ph.D.

Kritenko M. I., Ph.D.

Petrichkovich Ya. Ya., Sc. D.

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

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

Chaplygin Yu. A.,
Full Member of the RAS, Sc. D.

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

Enns V. I., Ph.D.

Editorial Staff Address

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

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal_EEM-3@mikron.ru

🌐 www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

The journal is published since 1965

Founder

“Molecular Electronics Research
Institute” Stock Company

Editor’s Column 5

Physical Phenomena

A. V. Belinsky, M. H. Shulman

On the Use of the Reference System for the “Point” Model of a Photon 6–10

P. I. Vysikaylo, V. C. Mitin, A. A. Yakushkin, V. I. Mashchenko

Quantum-Dimensional Effects in Physical Alloying Nanocomposites
by Nanostructures with a Great Affinity for Electrons..... 11–25

Development and Designing

N. S. Danilin, D. M. Dimitrov, I. H. Sabirov

Microsystems for On-Board Artificial Intelligence..... 26–29

**V. P. Timoshenkov, A. I. Khlybov, D. V. Rodionov, N. A. Shelepin,
A. V. Seletskiy**

CMOS-SOI Transistor Parameters Research Using Reflectometry
Method 30–35

E. S. Shamin, E. V. Ipatova, A. V. Kuzovkov, V. V. Ivanov, N. N. Balan

Rule-Based SRAF Generation for Two-Dimensional Topological
Structures With MRC Rules Being Considered: Problems and Solution... 36–41

Processes and Technology

E. S. Gornev

The Industrial Technology of Microelectronics 42–53

N. N. Balan, V. V. Ivanov, A. V. Kuzovkov, E. S. Shamin

Phase Shifting Masks in Modern Semiconductor Technology 54–63

A. Yu. Pavlov

Technology of Manufacturing Transistors with Depletion and
Enhancement of a Channel on Gallium Nitride..... 64–71

Mathematical Simulation

R. A. Soloviev, I. A. Kharitonov, D. V. Telpukhov

Research of Methods for Increasing the Fault Tolerance of Hardware
Implementations of Convolutional Neural Networks 72–77

Abstracts 78–80

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 (НАС)



ВИКТОР НАУМОВИЧ МОРДКОВИЧ

11 июля 1936 года – 20 июня 2019 года

С глубоким прискорбием сообщаем, что 20 июня 2019 года скончался сотрудник ИПТМ РАН, доктор физико-математических наук, автор статей и рецензент журнала «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника» **Мордкович Виктор Наумович**. Из жизни ушел прекрасный ученый и большой души человек.

Виктор Наумович родился в Москве 11 июля 1936 года. Окончил МГУ в 1959 году, в 1964-м защитил кандидатскую диссертацию, а в 1979 году докторскую, а в 1986-м получил звание профессора. Вся его трудовая деятельность прошла в «НПП «Пульсар» и в ИПТМ РАН.

Несомненно, заметный вклад В.Н. Мордкович внес в развитие радиационной физики полупроводников, физических основ современной технологии и приборов кремниевой электроники. Его работы в области механизмов образования и эволюции дефектов структуры полупроводниковых материалов, трансмутационного легирования кремния, а также в области технологии создания скрытых диэлектрических слоев с использованием ионного синтеза легли в основу создания методов повышения радиационной стойкости изделий микроэлектроники. Активное участие В.Н. Мордкович принимал в разра-

ботке технологии приборов с зарядовой связью, последние годы вел исследования в области магниточувствительных дискретных приборов и ИС.

Суммируя результаты научной деятельности В.Н. Мордковича, можно с уверенностью сказать о его существенном вкладе в развитие фундаментальных знаний в области физики твердого тела и создании научных основ высокотехнологичных производств современной микроэлектроники. Целая плеяда его учеников и воспитанников благодарна за годы совместной работы с таким ученым и человеком.

В.Н. Мордкович отличался особой доброжелательностью, тонким чувством юмора. С ним легко было дружить. Виктор Наумович всегда находил время для обсуждения научных и житейских проблем, до последних дней активно общался с коллегами в России и ближнем зарубежье. Несмотря на тяжелую болезнь, Виктор Наумович в меру своих сил всегда старался поддержать коллег и товарищей в их научных направлениях, в решении жизненных вопросов.

Память о Викторе Наумовиче как о крупном ученом, верном и мудром друге, прекрасном семьянине и просто хорошем человеке навсегда останется в наших сердцах.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Вышел очередной, 174-й, выпуск научно-технического издания «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника».

От имени редакционного совета хочу поблагодарить всех подписчиков за интерес, проявленный к нашему журналу. Основная цель, которую ставит перед собой коллектив редакции – сделать журнал более полезным, интересным и востребованным. Отбирая материалы для публикации в нашем издании, мы внимательно следим за актуальностью информации, хорошей ее структурированностью и высоким процентом содержательного наполнения.

В данном выпуске журнала представлены девять оригинальных статей, посвященных результатам актуальных научных исследований.

Номер открывается разделом «Физические явления», где проанализирована оригинальная работа Эйнштейна 1905 года и показано, что использование упрощенной системы отсчета для фотона не должно приводить к неверным физическим результатам, позволяя при этом эффективно объяснить различные аспекты квантовой нелокальности. Кроме того, в данном разделе предлагаются теоретическая разработка и верификация экспериментами методов создания и исследования свойств физически легированных материалов с пространственно-неоднородной структурой на микро- и нанометровом масштабе.

В следующем разделе «Разработка и конструирование» рассмотрена проблематика микросистем ИИ для создания интеллектуальных бортовых систем с применением технологии систем в корпусе. Также в данном разделе продемонстрирована возможность рефлектометрического метода для исследования параметров n -МОП-транзистора. Описываются проблемы, связанные с расстановкой RBSRAF для двумерных топологий с манхэттенской геометрией, и приводится пример их решения,



учитывающий ограничения, накладываемые правилами проектирования фотошаблонов.

В следующем разделе «Процессы и технология» обосновывается актуальность формулирования определения «промышленная технология микроэлектроники». Также данный раздел содержит обзор различных видов используемых фазосдвигающих структур, где описываются принципы функционирования основных типов фазовых фотошаблонов, рассмотрены их достоинства и недостатки, а также их место на мировом рынке фотошаблонов. Кроме того, в одной из статей рассматривается способ бездефектного низкоэнергетического сухого травления нитридных слоев в индуктивно-связанной плазме.

В заключительном блоке «Математическое моделирование» исследуются методы борьбы с ошибками, возникающими в процессе работы нейронной сети, аппаратно реализованной в режиме работы с фиксированной точкой.

Дорогие читатели, приглашаем вас к сотрудничеству в качестве авторов материалов и научных статей. Надеемся, что наш журнал будет полезен вам в научной и практической деятельности.

С уважением,
главный редактор журнала,
академик РАН

Г. Я. Красников

Об использовании системы отсчета для «точечной» модели фотона

► Белинский А. В.¹, Шульман М. Х.²

¹МГУ им. М. В. Ломоносова, ²Институт исследования проблем времени

Недавно в ряде публикаций нами был рассмотрен ряд феноменов, связанных с проблемами квантовой нелокальности. Было показано, что эти загадочные явления могут быть единообразно объяснены, если принять во внимание парадокс часов при распространении квантовых частиц. Действительно, известно, что для движущихся фотонов время как бы останавливается, а пройденное расстояние обращается в ноль. Более того, опираясь на волновые свойства материи, аналогичные представления удалось развить и для квантовых частиц, движущихся с досветовой скоростью. Как нами было установлено, некорректное понимание квантовой нелокальности основано на придании абсолютного характера наблюдению, выполняемому в лабораторной системе отсчета. Основываясь на относительности меры нелокальности в разных системах отсчета, мы в ходе нашего анализа использовали мысленную систему отсчета, связанную с упрощенной моделью фотона, в которой игнорируется наличие спина и факт аксиальной симметрии при движении фотона. Такая модель вызывает настороженную реакцию у некоторых специалистов, категорически отрицающих наличие системы отсчета, в которой фотон мог бы рассматриваться как покоящийся. В данной публикации нами проанализирована оригинальная работа Эйнштейна 1905 года и показано, что использование упрощенной системы отсчета для фотона не должно приводить к неверным физическим результатам, позволяя при этом эффективно объяснить различные аспекты квантовой нелокальности.

On the Use of the Reference Frame for the “Point” Model of a Photon

A. V. Belinsky¹, M. H. Shulman²

¹MSU, ²Institute for the Time Nature Exploration, MSU

We recently considered a number of phenomena about quantum non-locality. We showed that these «mysterious» phenomena can be explained by the same manner if one applied the clock paradox to quantum particles propagation. Really, a duration of a moving photon travel and its travel distance become zero. The more, the wave properties of a massive particle predict the close issue. As we revealed, the incorrect understanding of quantum non-locality is based on the operation with the absolute laboratory reference frame. Contrary, we consider a relative non-locality measure in the different reference frames that is associated with the simplified “point” model where we ignored the spin existing and its motion axial symmetry photon. Such model initiated some rejections due to existing impossibility of any reference frame where a photon can be considered as immobile. In this paper we analyze the original Einstein work (1905) that did not account results of the quantum electrodynamics, and photon localization problems. Finally, we show that the simplified pointed photon model does not lead the incorrect physical issues.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы, связанные с квантовой нелокальностью, запутанностью и коллапсом вектора состояния, интересны с точки зрения фундаментальной науки и связаны с рядом практических приложений,

например, параллельными квантовыми вычислениями. Поэтому попытки прояснения их природы не только имеют право на существование, но и весьма перспективны.

Можно ли связать систему отсчета с фотоном, движущимся со световой скоростью? Несмотря на ряд статей, опубликованных нами на эту тему (см., например, [1-5]), положительный ответ на поставленный вопрос часто вызывает несколько настороженную реакцию. Поэтому мы решили прояснить нашу позицию, чему и посвящена настоящая работа.

Как указано в [6], система отсчета есть воображаемое, лишенное массы, вообще говоря, произвольным образом деформирующееся тело отсчета, на котором проведена трехмерная координатная сетка, и в каждой точке тела отсчета есть прибор – часы, позволяющие фиксировать момент времени. Предполагается, что деформация тела отсчета происходит непрерывным образом, что события локализованы в одной точке и происходят мгновенно.

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ ЧАСТИЦЫ В ПРОСТРАНСТВЕ – ВРЕМЕНИ

Достаточно полный анализ релятивистских преобразований для «точечных» объектов приведен в основополагающей публикации Альберта Эйнштейна [7], где ее автор определяет 4-мерные системы координат (отсчета) и правила преобразования от одной такой системы к другой. В этой работе содержатся две части. Первая часть посвящена кинематике и содержит пять разделов:

1. Определение одновременности.
2. Об относительности длин и промежутков времени.
3. Теория преобразования координат и времени от покоящейся системы к системе равномерно и прямолинейно движущейся относительно первой.
4. Физический смысл полученных уравнений для движущихся твердых тел и движущихся часов.
5. Теорема сложения скоростей.

В этой части речь идет исключительно о пространственных и временных отрезках, при этом никаких логических противоречий даже для случая движения со скоростью света ($v=c$) не возникает. Во вторую часть, посвященную электродинамике, вошли разделы:

1. Преобразование уравнений Максвелла-Герца для пустого пространства. О природе электродвижущих сил, возникающих при движении в магнитном поле.
2. Теория аберрации и эффекта Доплера.

3. Преобразование энергии лучей света. Теория давления, производимого светом на идеальное зеркало.
4. Преобразование уравнений Максвелла – Герца с учетом конвекционных токов.
5. Динамика (слабо ускоренного) электрона.

Во второй части Эйнштейн отдельно рассмотрел «световой комплекс» без массы покоя (фотон) в §8, а тело с массой покоя μ_0 (электрон) – в §10. В последнем случае он получил соотношения для продольной и поперечной массы:

$$\mu'_{\text{прод.}} = \mu_0 \beta^3, \mu'_{\text{попер.}} = \mu_0 \beta, \beta = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}, \quad (1)$$

что, естественно, привело к бесконечностям при наличии массы покоя. Однако, еще до этого Эйнштейн специально рассматривал правила преобразования энергии и частоты фотонов («световых комплексов») для движущейся системы отсчета. Он нашел, что если обозначить через E энергию света, заключенную внутри рассматриваемой поверхности и измеренную в покоящейся системе, а через E' ту же энергию, измеренную в движущейся системе, то получим:

$$E' = E\beta(1-(v/c)\cos\varphi), \quad (2)$$

где φ – угол между линией, соединяющей источник света с наблюдателем, и скоростью наблюдателя v , отнесенной к координатной системе, покоящейся относительно источника света. Замечательно, пишет Эйнштейн, что и энергия, и частота светового комплекса с изменением состояния движения наблюдателя изменяются по одному и тому же закону, то есть

$$f' = f\beta(1-(v/c)\cos\varphi). \quad (3)$$

Таким образом, сам Эйнштейн, насколько можно судить, в определенном смысле вполне допускал анализ поведения фотонов при переходе от движущейся системы отсчета к покоящейся, и наоборот. Действительно, нетрудно заметить, что при $\varphi=0$ формула преобразования для энергии фотона переходит в

$$E' = E\beta(1-(v/c)) = \sqrt{\frac{1-v/c}{1+v/c}}, \quad (4)$$

то есть никаких бесконечностей не возникает.

ПОЧЕМУ НЕ СУЩЕСТВУЕТ СИСТЕМЫ ПОКОЯ ДЛЯ «РЕАЛЬНОГО» ФОТОНА?

Ответ на этот вопрос заключается в том, что фотон нельзя рассматривать в качестве точечной частицы.

Дело в том, что фотон всегда движется со скоростью света и обязательно обладает одной из двух круговых поляризаций (моментом вращения), то есть его спин может быть равным только +1 или -1 (но не нулю). Невозможность равенства спина нулю исключается требованием поперечности вектора волновой функции по отношению к направлению его импульса, то есть движение фотона характеризуется аксиальной симметрией, а не сферической (как у точечного объекта). Если бы масса фотона не равнялась нулю, то электромагнитные волны имели бы три, а не два поляризационных состояния. Именно из-за отсутствия у фотона массы, ему необходимо двигаться в вакууме с максимальной возможной скоростью – скоростью света. Он может существовать лишь в таком движении. Любая остановка фотона равносильна его поглощению. Поэтому, согласно квантовой электродинамике, «для фотона, движущегося со скоростью света, вообще не существует системы покоя» и к нему «неприменимо понятие спина как момента покоящейся частицы» [8].

Означает ли это, что представление о системе отсчета, связанной с фотоном, ни в каких случаях не может быть использовано? Мы считаем, что (слегка перефразируя автора работы [9]) может быть принят более прагматический подход, согласно которому систему отсчета для «точечного» фотона можно применять в той мере, в которой это не приводит к физически неверным результатам. А применительно к «остановившемуся» времени фотона и «сжатому» до нуля пройденному расстоянию, ситуация именно такая.

МОЖНО ЛИ ЛОКАЛИЗОВАТЬ ФОТОН?

Объект, движущийся с досветовой скоростью, может быть охарактеризован:

- эволюцией текущего положения объекта в функции времени (например, собственного);
- пространственным размером объекта (возможно, в терминах его волновых свойств).

«В нерелятивистской квантовой механике термин «координатное представление» используется для обозначения представления, в котором волновая функция $\psi(\vec{r})$ определена как проекция вектора состояния $|\psi\rangle$ на собственные состояния $|\vec{r}\rangle$ компонент \hat{x} , \hat{y} , \hat{z} оператора положения \hat{r} :

$$\psi(\vec{r}) = \langle \vec{r} | \psi \rangle. \quad (5)$$

Волновая функция в координатном представлении, следовательно, автоматически становится

функцией собственных значений оператора положения \hat{r} . Операторы положения действуют на волновые функции просто с помощью умножения. Однако в квантовой механике фотонов этот подход не работает из-за трудностей с определением оператора положения фотона. Вместе с тем, можно ввести функции координатного вектора \vec{r} для описания квантовых состояний фотона. Принимая эту менее строгую точку зрения, которая не связывает волновую функцию в координатном представлении с приведенным соотношением, устраняются последствия несуществования оператора положения \hat{r} . В принципе любая функция \vec{r} , которая адекватно описывает состояния фотона, может называться волновой функцией фотона в координатном представлении, и это предмет вкуса и используемого соглашения» [9]. Между тем «волновая функция фотона в координатном представлении может быть идентифицирована с функцией моды самой по себе. Она описывает состояние единичного фотона, а не состояние квантованного поля» [9].

В этой ситуации уместно вернуться к подходу Эйнштейна и оперировать не с положением фотона в привычном смысле, а с положением «светового комплекса» без массы покоя, но характеризуемого определенной энергией $h\nu$. Тогда текущая «координата» фотона, движущегося со скоростью c , казалось бы, с очевидностью может быть задана выражением $x = ct$. Однако это, по всей видимости, неверно. В действительности перемещение фотона в лабораторной системе отсчета представляет собой нелокальный процесс, и лишь перемещение серии фотонов, достигающих промежуточных точек, создает для лабораторного наблюдателя иллюзию, что существует некая общая для них траектория.

Наконец, методами квантовой электродинамики может быть выведено соотношение неопределенностей для одиночного фотона [9]. «Чтобы преодолеть трудность, связанную с несуществованием оператора положения фотона, роль плотности вероятности в конфигурационном пространстве играет плотность энергии. <...> Рассмотрим хорошо коллимированный вдоль оси z пучок света. Будем измерять ширину пучка, используя оператор центра энергии \hat{R} , введенный более 80 лет назад Бомом и Инфельдом. Даже полагая, что компоненты этого оператора не коммутируют, мы все еще располагаем наилучшей доступной заменой для несуществующего истинного оператора положения фотона. Поперечный размер пучка будет измеряться дис-

персией оператора центра энергии \hat{R} в поперечной плоскости:

$$\Delta \bar{R}_\perp^2 = \langle \bar{R}^2 \rangle - \langle \bar{R} \rangle^2, \quad (6)$$

а рассеяние поперечного импульса – дисперсией оператора поперечного импульса:

$$\Delta \bar{P}_\perp^2 = \langle \bar{P}^2 \rangle - \langle \bar{P} \rangle^2, \quad (7)$$

при этом выполняется следующее соотношение неопределенностей [9]:

$$\sqrt{\Delta \bar{R}_\perp^2} \sqrt{\Delta \bar{P}_\perp^2} \geq \hbar \gamma_\perp. \quad (8)$$

Безразмерный параметр γ_\perp зависит от среднего значения $\langle k_z \rangle$ компоненты волнового вектора в направлении распространения пучка. В пределе, когда $\langle k_z \rangle$ стремится к бесконечности, γ_\perp стремится к 1.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УПРОЩЕННЫХ СИСТЕМ ОТСЧЕТА ДЛЯ ФОТОНОВ ДРУГИМИ АВТОРАМИ

В качестве иллюстрации можно сослаться на статью А. Н. Ораевского [10], где ее автор из соображений наглядности приводит график «неподвижного» светового импульса в системе координат, движущейся со скоростью света.

Более глубокий пример приводится в книге [11] со ссылкой на оригинальные публикации Эддингтона [12] и Финкельштейна [13]. Речь идет о системе отсчета, связанной с фотонами, свободно падающими по радиусу к центру черной дыры. Для них координата r уменьшается с ростом времени t , $\langle \dots \rangle$ и ее можно записать в виде $t = t(V)$, где V – константа, характеризующая радиальную координату для фиксированного момента t . $\langle \dots \rangle$ Если мы возьмем множество фотонов при фиксированном t и припишем каждому фотону номер V , который в дальнейшем не меняется при движении фотона, то $\langle \dots \rangle V$ можно выбрать в качестве другой новой координаты. Правда, есть и существенное отличие – никакой наблюдатель не может двигаться вместе с фотоном, и в этом смысле новая система не подходит, строго говоря, под определение системы отсчета. Но в некоторых случаях такая «система» из пробных фотонов бывает удобна. Надо только всегда помнить, что V – световая координата (не пространственная и не временная)».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, анализ литературы и несложные соображения приводят к тому, что связать систему отсчета

с движущимся фотоном не является каким-то экстравагантным поступком. Но если так, то перестают быть загадочными и удивительными такие до конца непонятные явления как мгновенный коллапс волновой функции или таинственная связь квантовых частиц в запутанном состоянии [14–23]. При этом нет необходимости прибегать к привлечению взаимодействий неизвестной природы и «подправлению» специальной теории относительности. Не нужно также «расщеплять» волновую функцию на «пустые» и «непустой» волновые пакеты [24,25] и использовать концепцию «множественности миров» [26]. И все это достигается «минимальными затратами» и достаточно аргументированными соображениями. Вместе с тем мы, конечно, отчетливо понимаем, что предложенное нами решение является всего лишь вполне допустимой гипотезой, нуждающейся в дальнейшем исследовании.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-01-00598А.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Белинский А. В., Шульман М. Х.** Квантовые корреляции и сверхсветовое взаимодействие // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2016. № 4. С. 29–38.
2. **Белинский А. В., Шульман М. Х.** Об относительности нелокальности для фотонных корреляций // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2017. № 1. С. 38–45.
3. **Belinsky A. V., Shulman M. H.** A possible origin of quantum correlations // Journal of Russian Laser Research. 2017. V. 38. No 3. P. 230–240.
4. **Белинский А. В., Шульман М. Х.** О возможном объяснении квантовых корреляций // Метафизика. 2018. № 2(28). С. 71–77.
5. **Белинский А. В., Шульман М. Х.** Об относительности меры нелокальности в квантовой механике // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2018. № 3(24). С. 38–53.
6. **Зельманов А. Л., Агаков В. Г.** Элементы общей теории относительности. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 240 с.
7. **Эйнштейн А.** К электродинамике движущихся тел (1905). Собрание научных трудов. – М., Наука, 1965. Т. 1. 397 с.

8. **Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.** Квантовая электродинамика / 3-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 728 с.
9. **Bialynicki-Birula I., Bialynicka-Birula Z.** Uncertainty relation for focal spots in light beams // *Phys. Rev. A*. 2013. V. 88. No. 6. P. 052103-1-052103-6.
10. **Ораевский А.Н.** Сверхсветовые волны в усиливающихся средах // *УФН*. 1998. Т. 168. № 12. С. 1311-1321.
11. **Новиков И.Д., Фролов В.П.** Физика черных дыр. – М.: Наука, 1986. 328 с.
12. **Eddington A. S.** A comparison of Whitehead's and Einstein's formulas // *Nature*. 1924. V. 113. 192 p.
13. **Finkelstein D.** Past-Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle // *Phys. Rev.* 1958. V. 110. P. 965-967.
14. **Аристов В.В., Никулов А.В.** О причинах сомнений в реальности квантового компьютера // *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2018. № 2(170). С. 56-71.
15. The BIG Bell Test Collaboration. Challenging local realism with human choices // *Nature*. 2018. V. 557. P. 212-216.
16. **Rauch D., Handsteiner J., Hochtainer A., et. al.** Cosmic Bell Test Using Random Measurement Settings from High-Redshift Quasars // *Rev. Rev. Lett.* 2018. V. 121. P. 080403-1-080403-9.
17. **Rosenfeld W., Burchardt D., Garthoff R., et. al** Event-Ready Bell Test Using Entangled Atoms Simultaneously Closing Detection and Locality Loopholes // *Rev. Rev. Lett.* 2017. V. 119. P. 010402-1-010402-6.
18. **Handsteiner J., Friedman A. S., Rauch D., et. al.** Cosmic Bell Test: Measurement Settings from Milky Way Stars // *Rev. Rev. Lett.* V. 118. P. 060401-1-060401-8.
19. **Aspect A.** Viewpoint: Closing the Door on Einstein and Bohr's Quantum Debate // *Physics*. 2015 V. 8. P. 123-1-123-5.
20. **Аристов В.В.** Квантовая электродинамика реальных волн электронной плотности // *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2016. № 2(162). С. 5-18.
21. **Аристов В.В.** Квантовая механика реальных волн электронной плотности // *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2016. № 2(162). С. 19-28.
22. **Аристов В.В.** Основы неоклассической теории рассеяния рентгеновского излучения на свободных слабосвязанных электронах // *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2018. № 4(172). С. 5-17.
23. **Белинский А.В., Жуковский А.К.** О двух вариантах интерпретации свойств замкнутых запутанных систем // *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2018. № 4(172). С. 78-91.
24. **Bohm D.** A suggested interpretation of the quantum theory in terms of „hidden“ variables. I // *Phys. Rev.* 1952. V. 85. P. 166-179.
25. **Bohm D.** A suggested interpretation of the quantum theory in terms of „hidden“ variables. II // *Phys. Rev.* 1952. V. 85. P. 180-193.
26. **Everett Hugh III.** „Relative State“ Formulation of Quantum Mechanics // *Reviews of Modern Physics*. 1957. V. 29. No. 3. P. 454-462.

Квантово-размерные эффекты при физическом легировании нанокompозитов наноструктурами с большим сродством к электронам

► Ф. И. Высикайло¹, В. С. Митин², А. А. Якушкин³, В. И. Мащенко¹

¹МГОУ, ²ОАО «ВНИИНМ им. А. А. Бочвара», ³АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»

Обсуждаются основные задачи России в сфере высоких технологий. Предлагаются теоретическая разработка и верификация экспериментами методов создания и исследования свойств физически легированных материалов с пространственно-неоднородной структурой на микро- и нанометровом масштабе. Приводятся результаты исследований квантово-размерных эффектов при физическом легировании нанокompозитов наноструктурами с большим сродством к электронам. Теория сравнивается с имеющимися экспериментами. На верифицированной теории и экспериментах разработаны наноструктурированные материалы, в том числе с повышенной прочностью и износостойкостью, неоднородные на нанометровом уровне, физически легированные наноструктурами – квантовыми ловушками для свободных электронов. Решение этих задач позволяет создавать новые наноструктурированные материалы, исследовать их различные физические параметры, конструировать, изготавливать и эксплуатировать устройства с новыми техническими и функциональными возможностями, в том числе и для атомной промышленности. Управление нанокристаллической структурой и свойствами композитных многофазных материалов и покрытий может осуществляться путем изменения в них концентрации наноструктур свободного углерода. Установлено, что присутствие наноструктур углерода в композите значительно улучшает ударную вязкость, микротвердость, люминесцентные характеристики, температуростойкость, проводимость до десяти порядков и расширяет диапазон возможных применений таких композитов по сравнению с чистыми материалами, такими как медь, алюминий, карбиды переходных металлов, люминофоры, полупроводники (термоэлектрики), силиконовые (силоксановые, полисилоксановые, кремнийорганические) соединения.

Quantum-dimensional Effects in Physical Alloying Nanocomposites by Nanostructures with a Great Affinity for Electrons

P. I. Vysikaylo¹, V. C. Mitin², A. A. Yakushkin³, V. I. Mashchenko¹

¹MRSU, ²JSC "VNIINM named after A. A. Bochvar", ³JSC "SRC RF TRINITI"

We are discussing the main tasks of Russia in the field of high technologies. We propose theoretical development and verification by experiments of methods for creating and studying the properties of physically doped materials with a spatially inhomogeneous structure on a micro and nanometer scale. The results of studies of quantum-size effects in the physical doping of nanocomposites with nanostructures with high electron affinity are presented. The theory is compared with existing experiments. On the verified theory and experiments, nanostructured materials were developed, including those with increased strength and wear resistance, non-uniform at the nano-level, physically doped with nanostructures – quantum traps for free electrons. Solving these problems allows you to create new nanostructured materials, explore their various physical parameters, design, manufacture and operate devices with new technical and functional capabilities, including those for the nuclear industry. The nanocrystalline structure and properties

of composite multiphase materials and coatings can be controlled by varying the concentration of free carbon nanostructures in them. It is established that the presence of carbon nanostructures in the composite significantly improves the impact strength, microhardness, luminescence characteristics, temperature resistance and expands the range of possible applications of such composites compared to pure materials such as copper, aluminum, transition metal carbides, phosphors, semiconductors (thermoelectrics), silicone (siloxane, polysiloxanes, organic silicon) compounds.

ВВЕДЕНИЕ

В основе работы современных сотовых сетей лежат изобретения Попова (1895), Теслы и Маркони – первооткрывателей радиосвязи. Есть мнение, что и первый мобильник изобретен в СССР. Однако пионерами в создании реальных сотовых сетей прежде были в основном американские и европейские компании. Сейчас за лидерство в этой области прорывных технологий борются США и Китай. Потенциальная выгода от 5G-сетей может быть огромной, утверждают их сторонники. Владеющие патентами компании заработают миллиарды. В Китае уже с 2019 года развернута зона, где работает мобильная сеть 5G – средняя скорость передачи данных составляет 3,2–3,5 Гбит/с. При этом максимальная скорость может достигать 35 Гбит/с. Китайская компания Huawei планирует выпускать не только 5G-смартфоны, но и другие устройства. Например, компания уже сделала Wi-Fi-роутер, в который можно установить СИМ-карту и раздавать 5G-интернет. Технология 5G не ограничивается простым веб-серфингом. Высокие скорости передачи информации, маленькие задержки и повышение объема передаваемой информации позволяют расширить применение и в другие области. Например, можно передавать высококачественное изображение с камер дронов на монитор или очки виртуальной реальности. Можно без задержек транслировать или смотреть 4D-видео и многое другое – применений найдется много [1]. В России появление сетей 5G тоже ожидается, но как всегда с задержкой.

Противостояние США и Китая в сфере высоких технологий создает проблемы и для России.

В основе любых технологий лежат не только открытия и патенты, но и те или иные полезные ископаемые, из которых производят чипы, интегральные схемы и т. д. Пока Китай по-прежнему является крупнейшим производителем и экспортером редкоземельных металлов (РЗМ), обеспечивая, по разным данным, от 90 до 97% глобальных потребностей (с учетом добычи РЗМ в Конго). К 2020 году спрос на РЗМ в России, по прогнозам экспертов, достигнет 5–7 тыс. т в год, по более оптимистичному сценарию – почти 13 тыс. т.

Для прорыва в сфере высоких технологий правительство России решило вернуться на мировую арену производителей РЗМ. Ключевая для современной науки и техники группа металлов будет, наконец, добываться и перерабатываться в России. По крайней мере, уже озвучены планы по началу разработки одного из крупнейших в мире месторождений, находящегося в Якутии. Томторское месторождение РЗМ является одним из крупнейших в мире. Его прогнозные ресурсы оцениваются в 154 млн т руды. Томторское месторождение в Якутии запустят в 2021–2022 годах. Томторское является единственным месторождением в стране с запасами ниобия и редкоземельных металлов. Попутными элементами в извлекаемой руде являются уран, который в составе руды составляет 0,005% и торий – 0,15% [2].

Если основной вопрос в производстве высокотехнологичной продукции – это производство РЗМ, то второй вопрос – это их экономное расходование и эффективное функционирование в высокотехнологических устройствах. Экономить такие металлы возможно при их бережном расходовании, как в производстве РЗМ и продукции из них, так и при повышении рабочего срока и эффективности функционирования устройств на базе РЗМ. Эти параметры устройств или гаджетов определяются открытием и эффективным применением различных квантово-размерных эффектов.

В основе любых прорывных технологий и последних достижений лежат те или иные открытия в создании и применении новых материалов и открытия квантово-размерных эффектов в микро- и наном мире, позволяющие существенно повысить эффективность функционирования наноконструктов. Интерес к наноструктурированным углеродом материалам проявляется в ряде современных экспериментальных работ, выполненных в России и за рубежом (см. подробнее [3]). Это связано с уникальными свойствами, возникающими при наноструктурировании композитных материалов структурами из углерода. Например, они в десятки раз становятся более прочными, пластичными, повы-

шаются люминесцентные характеристики, проводимость можно менять в диапазоне до десяти порядков и т. д. В настоящее время в научной литературе отсутствуют общепринятые четкие представления о механизмах, приводящих к появлению уникальных свойств у таких наноструктурированных композитов, нет описания комплекса свойств, ответственных за их технические характеристики. Механизм физического легирования и процессы, ответственные за существенное изменение свойств нанокompозитных материалов при их физическом легировании наноструктурами из углерода выявлен впервые в мире в работах [4, 5] (рис. 1). В данной работе анализируются основные достижения, полученные в России в различных экспериментальных работах по исследованию влияния процессов физического легирования на свойства нанокompозитов на базе различных материалов: меди, алюминия, карбидов переходных металлов, люминофоров, полупроводников (на примере термоэлектриков), силиконовых (силоксановых, полисилоксановых, кремнийорганических) соединений. Метод физического легирования нами исследуется с целью сравнить и предложить общие принципы существенной модификации свойств нанокompозитов физическим легированием наноструктурами, обладающими большим сродством к электронам, и поэтому являющихся эффективными ловушками для свободных электронов в нанокompозитах. В этом плане оказывается, любые наноструктуры углерода обладают уникальными свойствами [5].

Свободный углерод встречается как в природе, так и во многих изделиях микро- и нанoeлектроники в различных аллотропных формах. Углерод является единственным элементом в периодической таблице, который имеет многообразие аллотропных форм. Как известно, имеются стабильные изомеры с 1 (карбины – линейные структуры), 2 (графены – двумерные структуры) или 3 (алмазы – трехмерные структуры) измерениями. Из-за возможности различных связей электронных состояний атомов углерода в молекулах (с различной топологией связей атомов), формирующих топологически разные, но взаимно совместимые привязки, может приводить к богатой гамме электрических свойств, связанных с конкретной геометрией наноструктур. Схематично наноструктуры углерода могут функционировать в качестве проводника в цепи sp^1 – карбины – и sp^2 планарной структуры графена и графита, или как широкозонный диэлектрик с sp^3 -связями, например, алмаз и др.

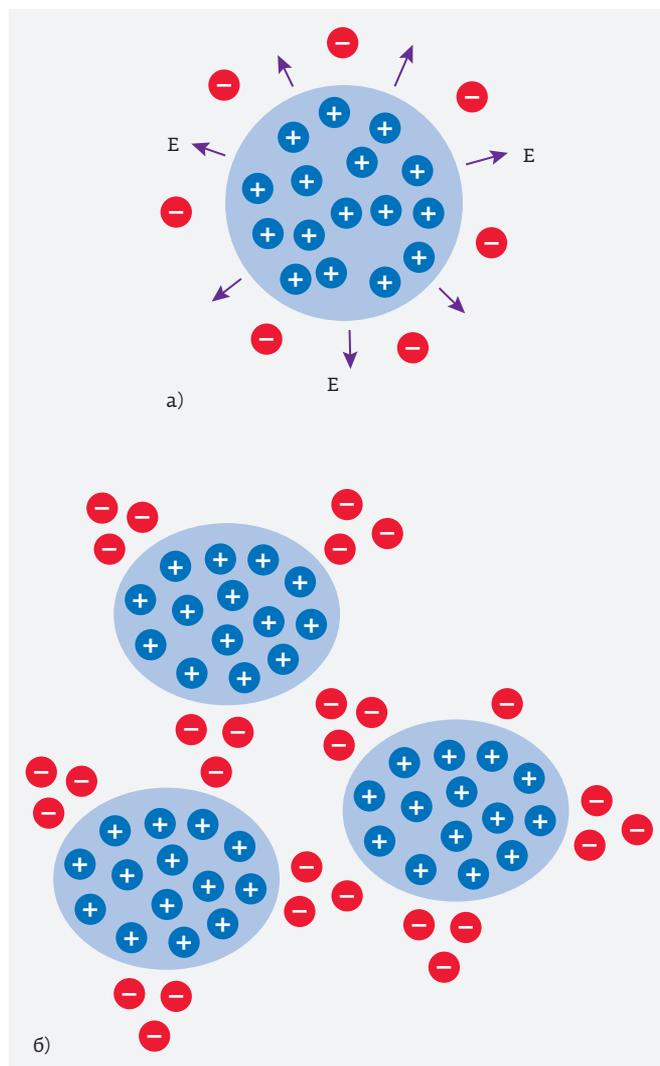


Рис. 1. Разделение заряда при физическом легировании: а – модификация свойств композитных материалов слоями объемного заряда, формируемого ловушками для электронов. Схема физического принципа легирования материалов; б – схема кулоновского обжата поляризованных сложных структур. Стрелками обозначено направление кулоновских сил, обжимающих наноструктурированный поляризующийся композит

Происхождение этих свойств может быть отнесено непосредственно к типу гибридизации: sp^1 , sp^2 или sp^3 . Первые два имеют потенциал, чтобы сформировать связи, которые являются электропроводящими, а sp^3 обладает теплоизолирующими свойствами. Эти свойства позволяют предполагать, что наноструктурированные композитные материалы имеют мощный потенциал для их применения в транзисторах и других электронных компонен-

тах уже следующих модификаций систем передачи данных и других применений «умных» наноконкомпозитов, в том числе и в устройствах сотовых сетей следующих поколений [3, 6].

Именно структуризация объемного заряда, обуславливает новые свойства наноконкомпозитов на основе меди, алюминия, карбидов переходных металлов, люминофоров, полупроводников и др. наноконкомпозитов, физически легированных структурами из углерода. Схема физически легированного наноконкомпозита (рис. 1) в общем соответствует разделению заряда в наноконкомпозите медь-углерод [5] или карбид-углерод [3]. Структуры с плюсами – это нанокристаллы металла [5], карбида металла [3] или полупроводника (термоэлектрика и др. [7]), а с минусами – легирующие наноструктуры с большим сродством к электронам.

Наноконкомпозиты можно создавать различными методами:

- перемешиванием нанопорошков в мельницах с последующим компактированием и отжигом;
- методом высокоскоростного плазменного магнетронного напыления с формированием наноконкомпозитной пленки на поверхности подложки;
- напылением или осаждением примеси на поверхность физически легированного материала (например, люминофора);
- травлением, механическим воздействием на материал с изменением его поверхности или внутренней структуры при бомбардировке высокоэнергетичными частицами, создании полостей, каверн, направляющих линий и даже применение плоскостей кристаллических решеток и т. д.

Длины волн де Бройля свободных электронов обычно превышают межатомные расстояния и это способствует выдавливанию как электронов, так и возбуждений в область полостей и каверн, что, соответственно, приводит к локализации электронов и разделению заряда в так структурированных наноконкомпозитах.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПО-РАЗНОМУ ЛЕГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Мы выделяем для удобства два типа легирования. Это химическое легирование и физическое легирование композитов [8–13].

При химическом легировании кристаллов инородными атомами происходит внедрение инородного атома в кристаллическую решетку. Это

возмущает решетку и приводит к волновым колебаниям на наноуровне относительной диэлектрической проницаемости легируемого материала [8–13]. Такое легирование применяется при изготовлении транзисторов, используемых в устройствах сотовых сетей. Методы физического легирования пока в них широко не применяются. (Хотя любая структуризация на микро- и наноуровне может быть отнесена к физическому легированию материала, например формирование нано- и микроструктур при изготовлении интегральных схем и т. д.).

При физическом легировании наноструктурами с большим сродством к электронам происходит вытягивание части электронов из кристалла в легирующую микро- или наноструктуру. Это приводит к кулоновскому взаимодействию уже положительно заряженного микро- или нанокристалла с отрицательно заряженной легирующей наноструктурой (рис. 1). Это проявляется, например, в изменении люминесцентных характеристик нанокристаллов, кулоновскому упрочнению материалов, исключению рекристаллизации так легируемого наноструктурированного материала и проявлении других квантоворазмерных эффектов. Методики получения наноструктурированных композиционных многофазных наноконкомпозитов различной природы, физически легированных наноструктурами углерода, и исследование их свойств в данной работе нами проведено на примере физического легирования нанокристаллов меди, алюминия, люминофоров, полупроводников (на примере, термоэлектриков и силиконовых соединений), карбидов переходных металлов. В ссылках на экспериментальные работы можно найти не только результаты исследований свойств наноконкомпозитов, но и методы их создания. Перечислим основные десять квантоворазмерных эффектов, экспериментально и аналитически исследованных в России.

ДЕСЯТЬ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ФИЗИЧЕСКОМ ЛЕГИРОВАНИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

Нарушение электронейтральности (поляризация) на наноуровне (рис. 1) приводит к десяти поляризационным квантово-размерным эффектам, открытым в [3–5; 7–12] и экспериментально исследованных в работах [3, 5, 7, 12, 14–18].

Первым эффектом является кулоновское упрочнение (стягивание, фокусировка, обжатие, сжатие, кумуляция) положительно заряженных нано-

кристаллов нанослоями отрицательно заряженных ловушек для электронов (рис. 1б) [3–5, 8–12]. Этот квантово-размерный эффект был исследован экспериментально на примере физического легирования таких материалов, как полупроводники (термоэлектрики) [7], медь [5, 12, 14, 16, 17], алюминий [15] и карбиды переходных металлов [3]. Согласно экспериментальным наблюдениям получено упрочнение меди и алюминия, физически легированных фуллеренами до 10 ГПа, а пленок меди наноструктурами графита до 4 ГПа [16]. Упрочнение карбидов переходных металлов физическим легированием пленок наноструктурами углерода, создаваемых методом магнетронного распыления, наблюдалось до 31 ГПа [3]. При этом теоретически возможным считается упрочнение при физическом легировании до 100 ГПа [4]. Согласно [19] силы сцепления и силы противодействия сжатию равны в кристаллических материалах друг другу. Поэтому упрочнение материалов соответствует такому же увеличению микротвердости наноконкомпозита [12, 19].

Второй эффект – генерация электрических полей (до 10^{11} В/м) и потенциалов, которые «нагревают» электроны в области поверхности нанокристалла (см. рис. 1а) [4, 10, 11]. При таком физическом легировании свойства поверхности объемно заряженных нанокристаллов также изменяются, например, из-за увеличения средней энергии свободных электронов у поверхности нанокристалла. Это приводит не только к динамическому упрочнению физически легированных нанокристаллов, слабой модификации их кристаллической решетки, но и изменению физических и химических свойств, обусловленных каталитическими свойствами электрических полей. Так, согласно [17], усиление люминесцентных характеристик люминофоров, физически легированных наноструктурами углерода, происходит до 50%.

Третий эффект заключается в том, что напряженность электрического поля на поверхности нанокристалла зависит от концентрации ловушек на поверхности физически легируемого материала [4]. Это приводит к изменению энергии электронов у его поверхности, а значит, к изменению числа проникающих в квантовый резонатор (ловушку) электронов. И если в квантовом резонаторе возможен только резонансный спектр локализованных электронов, как в фуллерене C_{60} [7–12], то в соответствующей области параметров будет наблюдаться концентрационно-поляризационно-квантово-размерный эффект Высыкайло второго типа (рис. 2). Применяя этот квантово-размерный эффект можно модифицировать свойства термоэ-

лектриков, изменяя концентрацию нанокристаллических частиц в наноконкомпозите [7–12]. В экспериментах [7] удалось, применив физическое легирование термоэлектрика фуллеренами, повысить его эффективность на 30%.

Четвертый эффект обусловлен кумуляцией (локализацией) свободных электронов в ловушке – квантовом резонаторе. Например, в фуллерене, согласно экспериментам [20], может аккумулироваться до шести электронов на один C_{60} с резонансной кинетической энергией от 0,24 до 12 эВ [21–23]. Это может приводить к кумуляции энергии ферми-газа до 30 эВ в одном фуллерене. Идеальная форма C_{60} позволила автору [11] привлечь математическую модель, разработанную Гамовым для описания проникновения α -частицы через потенциальный барьер. Модифицированная в [11] модель Гамова позволила аналитически рассчитать резонансные энергетические уровни захваченных электронов для всех сферических квантовых резонаторов (C_{60} , C_{70} и более старших фуллеренов). Из сравнения с экспериментами удалось определить эффективные поляризационные размеры для различных фуллеренов (r_{ind} для C_{60} – 0,26 нм и для C_{70} – 0,28 нм), на которых для вылетающих электронов из фуллерена возникает поляризационный потенциальный барьер высотой порядка 18 эВ, возвращающий электрон обратно в полость фуллерена (рис. 3). Хорошее согласие теоретической модели и экспериментальных исследований в [21–23] позволило рассчитать эффективные поляризационные размеры для всех типов старших фуллеренов [8–12]. Здесь же, на базе сравнения аналитических расчетов с экспериментами [21–23], было открыто расщепление уровней с главным квантовым числом n на два, соответствующие: $(cn) \sin$ -решениям и $(cn - 1/2) \cos$ -решениям уравнения Шредингера (сведенного к первой краевой задаче Гельмгольца) для полых сферически симметричных квантовых резонаторов. Эти исследования привели к открытию кумулятивной квантовой механики в [8–12], в которой ψ -функции могут неограниченно кумулировать к центру полых сферически или цилиндрически симметричных квантовых резонаторов для волн де Бройля квантовых частиц [8–12]. При этом регуляризация неограниченных решений для собственных ψ -функций в полых квантовых резонаторах происходит в результате учета геометрического регуляризирующего коэффициента $4\pi r^2$ при расчете вероятности нахождения частицы в слое $dr - W = 4\pi r^2 |\psi|^2 dr$ для сферически симметричных резонаторов и соответственно $2\pi r$ при цилиндрической симметрии резонатора.

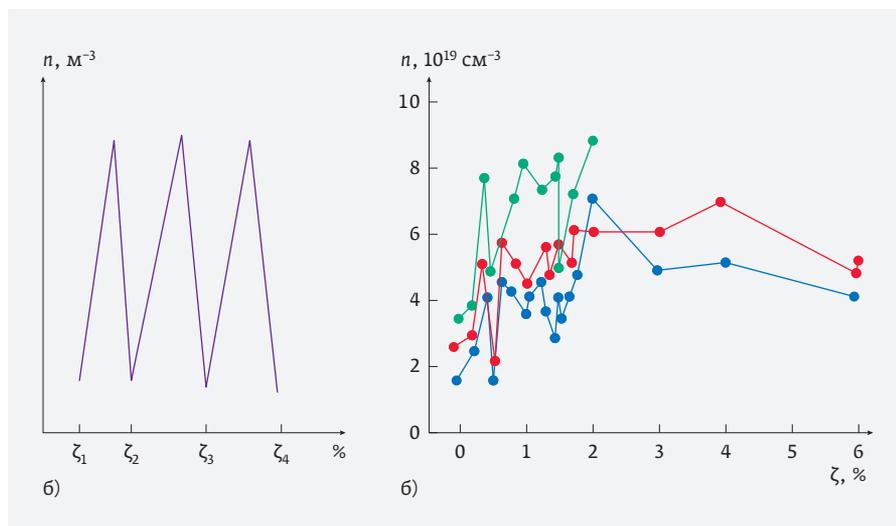


Рис. 2. Концентрационно-квантово-размерный эффект: а – проявление в макропараметрах наноконкомпозита квантово-размерного эффекта Высикайло второго типа, обусловленного поляризационным захватом электронов поляризующимися полыми молекулами [8–12]. Характерная зависимость параметров наноконкомпозита, например концентрации ионов или электронов n от объемного содержания квантовых резонаторов C_{60} в композите. Профили сдвигаются с изменением характерного радиуса нанокристаллитов, формируя с относительной концентрацией ловушек квантово-размерную пару, меняющую параметры наноструктурированного композита в мезомире [11, 12]; б – результаты экспериментальных измерений резонансных профилей концентрации электронов при изменении относительной концентрации ловушек при легировании фуллеренами C_{60} нанокристаллов полупроводников (термоэлектриков) при различных температурах (от 295 до 77 К). Характерный радиус нанокристаллитов после отжига $R \approx 17$ нм [7]

При этом полный резонансный энергетический спектр ($E_{n-1/2}, E_n$) квантовых частиц не зависит от симметрии **полых** квантовых резонаторов, а зависит только от размера полого квантового резонатора R . Аналитические исследования, проведенные в [8–12], и сравнение их результатов с экспериментами [21–23] показали, что гипотеза де Бройля о том, что частицы ведут себя как волны, для полых квантовых резонаторов работает и в случае кумулятивных квантовых явлений в полых поляризующихся сферически и цилиндрически симметричных резонаторах, как и в случае обычных акустических резонаторов [8–12], применяемых для исследования солюминесценции (СЛ) [24]. Здесь предложена модель, объясняющая возникновение однопузырьковой СЛ, основанная на учете дополнительного резонансного поглощения энергии одиночным кавитационным пузырьком в симметричном акустическом поле [24].

Квантово-размерные поляризационные эффекты следует учитывать и при взаимодействии атомов и молекул в плотных средах [25]. Это приводит к увеличению эффективных расчетных сечений трехтельных взаимодействий атомов, молекул и более сложных структур из атомов и решению ряда парадоксов (несовпадения экспериментальных результатов и теоретических представлений) [12, 25, 26].

Пятый эффект является следствием четвертого квантово-размерного эффекта. Вернее, следствием возможности захвата электронов в каверну, полость или трещину. При энергетической нагрузке материалов, например при облучении их нейтронами, любыми формами электромагнитного излучения, трении, изгибах и др. функциональных энергетических нагрузках, происходит накопление поступающей извне энергии ферми-газом, локализованным в материале. Электроны в материале находятся в кулоновских потенциальных ямах атомных ядер, и по мере увеличения полной энергии электрона в кулоновской

яме происходит уменьшение его кинетической энергии. Согласно основам квантовой механики, длина волны де Бройля такого электрона увеличивается, а значит, происходит распухание атома. Поэтому возбуждения имеют свойство вытесняться к поверхности и самофокусироваться к внутренним неоднородностям функционирующего материала. По мере увеличения числа возбужденных атомов происходит заметное локальное распухание нагруженных материалов, рост трещин и изменение других физических и химических свойств, приводящих к ухудшению функциональных свойств материалов и даже их разрушению. Вспухание и процессы самофокусировки (кумуляции, локализации) распухания способствуют формированию и росту трещин и локализации уже свободных электронов в трещине или каверне. Дальнейшее наполнение трещин свободными электронами, как наиболее подвижного и объемного газа, обусловлено вытес-

нением свободных электронов из материала в трещину и отражением электронов границами трещин обратно в трещину. Это происходит аналогично, как и в случае поляризационного захвата электрона фуллереном (см. рис. 3). В трещине с большим числом электронов из-за электрон-электронных столкновений происходит формирование функции распределения электронов (ФРЭ) по энергиям, и так как геометрия трещин имеют, как правило, коническую форму, то это сопровождается вытеснением высокоэнергетичных электронов в область носика трещины. Увеличение давления локализованного в трещине ферми-газа, геометрия кумуляции энергии к носику трещины и приводят к катастрофическому росту трещины и разрушению материала, не успевающего диссипировать (рассеивать) внешнюю энергию, кумулирующую в трещину функционирующим материалом. Согласно сказанному выше за все это ответственен ферми-газ, вернее, увеличение и кумуляция полной энергии в трещине малой части электронов функционирующего материала. Увеличение количества возбужденных электронов в области каверны или трещины приводит к ее вначале медленному, а затем катастрофическому взрывному росту по мере усталости материала и накопления в нем избыточной кинетической энергии электронов, переходящей в потенциальную энергию, сосредоточенной в трещинах. При этом прочность трещины из-за ее геометрии по мере ее роста уменьшается, а поверхность и объем, в которые свободными электронами кумулируется энергия, растут.

Поэтому внедрение в физически легируемые наноконпозиты самых прочных нанометровых ловушек для свободных электронов (с резонансным энергетическим спектром от 0,24 до 12 эВ) C_{60} в малых количествах, существенно не изменяющих полезные свойства наноконпозитных материалов, позволяет в ряде условий уменьшить количество свободных электронов и тем самым ослабить катастрофический рост распухания и трещин в функциональных материалах, испытывающих энергетическую нагрузку. Эти сферические полости – C_{60} способны концентрировать до шести электронов с полной энергией до 30 эВ. При этом прочность каркаса фуллерена соответствует прочности графена и превосходит прочность алмаза. По этой причине такая сферически симметричная ловушка, в отличие от каверны или трещины, не увеличивается в объеме, не распухает, что существенно увеличивает порог катастрофических разрушений наноконпозитов. Такое физическое легирование

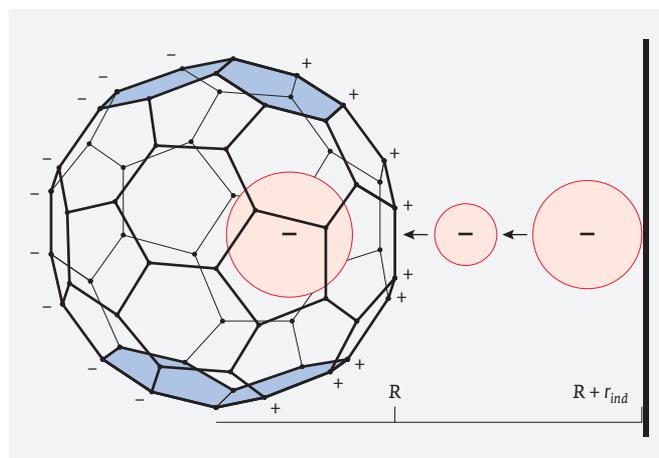


Рис. 3. Схема кумулятивного сброса электрона с энергией от 0,2 до 12 эВ в полость молекулы C_{60} и резонансного образования отрицательного иона $e_k@C_N$. Приведено последовательное уменьшение длины волны де Бройля электрона, налетающего на поляризующуюся им же молекулу фуллерена [11, 12]. Поляризационный барьер представлен в виде черного прямоугольника справа.

повышает срок пригодности наноконпозитов, существенно увеличивает надежность и продолжительность их функционирования в рабочем состоянии. Существенное повышение надежности при физическом легировании наноконпозитов, несомненно, будет востребовано в атомной промышленности, при физическом легировании ТВЭЛов и их защитных оболочек [27]. (В некотором плане это явление – физическое легирование фуллеренами – аналогично высверливанию отверстия в стекле с трещиной в области ее конца и начала. Этот способ применяли автолюбители. Отличие существенно только в характерных размерах структур).

Шестой эффект – левитация (зависание, отталкивание) положительно заряженных наноструктур физически легированного материала друг над другом (см. рис. 16). Этот эффект противодействует процессам рекристаллизации в наноконпозитах, что существенно увеличивает срок их функционирования [3, 10–12].

Седьмой эффект – кулоновское плавление наноконпозитов (нанокристаллов фуллерена), возникающее при захвате k электронов молекулами фуллерена в фуллерите. В кристалле фуллерита молекулы C_{60} связаны между собой слабыми вандер-ваальсовскими силами. Энергия связи одной молекулы фуллерена в нанокристалле фуллерита не превышает 1,6 эВ [28]. При этом потенциальная энергия кулоновского

взаимодействия двух отрицательных ионов в фуллерите с k электронами порядка $1,4 \cdot k^2$ эВ (среднее расстояние между фуллеренами в фуллерите – $D \approx 1$ нм). Поэтому захват нескольких электронов из физически легируемого фуллеренами нанокристалла приводит к кулоновскому распылу наноструктур фуллерита и покрытию монослоем из отрицательно заряженных фуллеренов легируемого положительно заряженного нанокристалла (см. рис. 16) [3, 11, 12]. При этом одна молекула фуллерена C_{60} может захватывать до шести электронов [20]. Отметим, что таким свойством распадаться на строго нанометровые структуры в принципе не могут обладать ни нанотрубки из-за их запутанности, ни нанографены из-за их прочности. В экспериментах именно это свойство фуллеритов позволило создать нанокompозитные материалы при физическом легировании фуллеренами C_{60} термоэлектриков [7], меди [14] и алюминия [15] с уникальными функциональными и прочностными свойствами. Но наиболее значи-

тельное продвижение в повышении прочностных свойств наблюдалось при физическом легировании карбидов переходных металлов [3]. Теорией в [4, 12] предсказывается возможность повышения микротвердости до 100 ГПа.

Восьмой эффект – кумуляция потоков электронов в точках либрации между положительно заряженными наноструктурами (см. рис. 4 а, б). Эти эффекты пока изучены в газоразрядной плазме [29] и недостаточно подробно в нанокompозитных материалах. Этот кумулятивно-квантово-размерный эффект, обусловленный захватом в квантовый резонатор свободных электронов с резонансной энергией и формированием положительно заряженных нанокристаллов легируемого материала, может быть использован для управления проводимостью, теплопроводностью и другими свойствами нанокompозитов.

В качестве **девятого эффекта** приведем противодействие электронов, захваченных в ловушку,

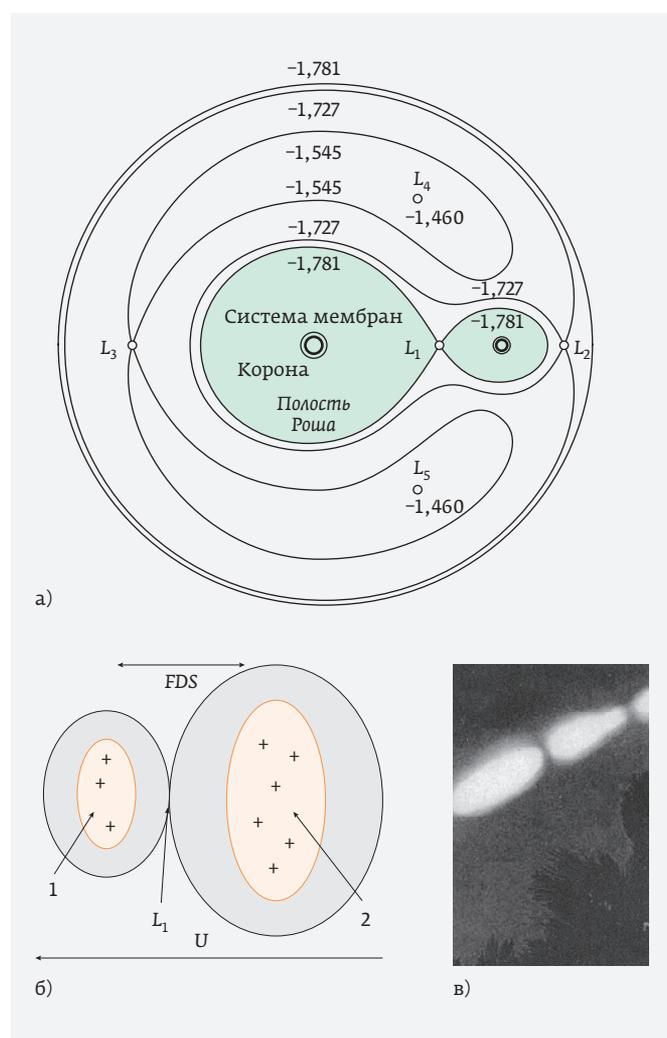


Рис. 4. Схемы кумулятивно-диссипативных структур: а – сечение поверхностей равного потенциала (с учетом центробежного потенциала) в модели Роша в орбитальной плоскости двойной системы. Схема поверхности Роша состоит из двух замкнутых полостей, окружающих обе материальные точки (две звезды или звезды и планеты, например, Солнца – массивная точка слева и Юпитера – массивная точка справа) и имеющих общую точку L_1 . Точки либрации и кумуляции Лагранжа – Эйлера L_{2-5} обусловлены учетом интерференции далекодействующих нелокальных гравитационных и центробежных потенциалов или инерционностью гравитирующих тел (члена $m(V \cdot \nabla V)$ в уравнении переноса импульса); б – поперечное сечение равных потенциалов согласно модели Высикайло – Роша [29] в плоскости поперечного сечения двух положительно заряженных плазменных структур. Эквипотенциальные поверхности состоят из двух замкнутых полостей 1 и 2, например, двух положительно заряженных 3D-конечных плазменных структур: катодного пятна 1, например, слева и положительного столба 2 справа (или две положительно заряженных страты) и имеющие общую точку L_1 – точку кумуляции электронных потоков (L_1 – точка кумуляции потоков электронов или фокус для электронов); U – внешнее падение потенциала, электроны в нем движутся от точки 1 к точке 2; в – яркая иллюстрация далекодействующей конвективной нелокальности – четочная молния с точками кумуляции потоков электронов и фарадеевыми темными пространствами (FDS) между светящимися, положительно заряженными плазмоидами [29]

внешнему воздействию на ловушку и весь нанокондитивный материал (см. рис. 3). В этом случае электроны уже на размерах $D=2(R+r_{ind})$ от физически легированного ловушками нанокристалла противодействуют внешнему воздействию, сохраняя физически легированный материал от разрушения; R – радиус ловушки; r_{ind} – характерный индукционный размер, на который выходит электрон из ловушки. В экспериментах этот эффект наблюдался при покрытии металлических изделий графеновыми листами и привлекался для объяснения свойств белых карликов в астрофизике Френкелем и ранее в работе Фаулера. Оказывается, дуальными свойствами фокусировать и противодействовать сжатию обладают локализованные в кулоновской яме любые электроны в любых квантовых резонаторах с размерами от 10^{-15} м (в этом случае роль электронов играют отрицательные мезоны [30]) до 10^{26} м.

Десятый эффект заключается в существенном изменении проводимости материалов, физически легированных наноструктурами из аллотропных форм углерода. Так, применение нанотрубок может приводить к эффектам квантовой баллистической проводимости в отрицательных ионах из нанотрубок, поляризационно захвативших электроны. Метод физического легирования нанотрубками позволяет изменять проводимость исходного силоксана на 10 порядков [31]. Как показано в [10–12], если для фуллеренов C_{60} поляризационная длина, на которую согласно квантовой механике может отходить локализованный поляризационным потенциалом электрон порядка $r_{ind}=0,26$ нм, а для C_{70} – $r_{ind}=0,28$ нм (см. рис. 3), то для углеродной нанотрубки поляризационная длина r_{ind} определяется длиной нанотрубки L . Это приводит к существенному понижению нижнего уровня собственного (резонансного) энергетического спектра квантового резонатора для электронов и его стремлению с увеличением длины L к сплошному спектру. Следовательно, в окружении нанотрубки может находиться существенно больше свободных электронов с резонансной энергией и тем самым способных локализоваться внутри и вокруг области нанотрубки, что может существенно повышать эффективность нанотрубок в эмиссионных явлениях по сравнению с фуллеренами. Но понижение нижнего энергетического уровня у нанотрубок приводит к повышению частоты сброса электронов, ранее захваченных нанотрубкой. Если аналитические расчеты, проведенные в [8–12] для фуллеренов, были подтверждены в ряде экспериментов [3, 5, 7, 12, 14–18], то для нанотрубок такие расчеты дают неоднозначные резуль-

таты. Эти двойственные (дуальные) выводы для поляризующихся углеродных нанотрубок необходимо проверять в экспериментах с нанотрубками с заданными длинами $L=const$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время происходят коренные изменения в сфере новых технологий. Связано это с тем, что наступила эра создания и применения новых материалов, свойства которых определяются структурными элементами наноразмерного диапазона (порядка 100 нм). Здесь наиболее важные особенности характеристик наносистем обусловлены не конкретным уменьшением частиц, элементов или структур, а принципиально новыми качественными явлениями, присущими наномасштабу, когда проявляется влияние на макроскопические параметры получаемых продуктов *закономерностей квантовой механики, электрических полей и размерных поверхностных эффектов*. Считается, что к нанотехнологиям относятся технологии, в которых конструирование материалов определяется характерными размерами композитов от 1 до 100 нм. Действительно, характерный квантовый размер свободного электрона при комнатной температуре или его длина волны де Бройля равна $l_e=12,25[\text{Å}]/\sqrt{\epsilon} \approx 7,6$ нм. Здесь ϵ – кинетическая энергия электрона в эВ. В средах влияние возмущения с характерным размером l (или $l_e=7,6$ нм) оказывает существенное влияние на размерах в несколько раз больших, порядка $10 \cdot l$ (или 76 нм). Следовательно, нанотехнологии это – технологии, используемые в комфортных для человека условиях (при комнатной температуре), в которых основным элементом конструирования композитных материалов может оказаться поляризационный захват одного или нескольких свободных электронов [3, 12, 18]. Электрон обладает отрицательным зарядом. Кулоновские потенциалы, модифицирующие свойства нанообъектов возникают в результате формирования и модификации двойных слоев объемного заряда в нейтральных наноструктурах [3, 8–12] (рис. 1). Кулоновские силы являются все определяющими на уровне наноразмеров и являются дальнедействующими. Поэтому формирование нанокластеров или наноструктур, способных захватывать электроны с резонансной энергией (ловушек для свободных электронов) может существенно модифицировать макросвойства нанокондитивов. Это явление обусловлено нарушением нейтральности на наноразмерах (рис. 1). Даже в этих явлениях квантовый характер нанотехнологических процессов в корне меняет способы создания материалов

и устройств. Открываются неограниченные возможности по синтезу наноразмерных структур и, что самое главное, самосборки их в микро- и макроструктуры с уникальными свойствами и функциями. Это понимание поистине революционный шаг, приводящий к радикальным изменениям в технологии производства новых материалов для различных отраслей промышленности. Углеродные структуры обладают большим сродством к электрону, а полые структуры типа фуллеренов, нанотрубок и иных замкнутых структур, ограниченных плоскостями графена, могут осуществлять захват резонансных электронов и тем модифицировать свойства нанокompозитов, содержащих наноструктурированный углерод (рис. 1).

Известно, что для создания современной техники 4+ и 5-го поколений весьма актуальным является применение высокотемпературных материалов на основе химических соединений переходных металлов IV-VI групп периодической системы элементов с азотом, бором, кремнием и углеродом. Как показано в данной работе, существуют методы физического легирования, в том числе и таких материалов, позволяющие эффективно улучшить их эксплуатационные характеристики. Согласно разработанным и экспериментально верифицированным методам физического легирования ряда нанокompозитов, варьируя составом получаемого многофазного композита, можно существенно изменять не только его структуру, но и полезные свойства. Эти материалы и изготовленные из них нанокompозиты представляют интерес и для устройств 5G-сетей.

В настоящее время уже проявлен интерес к нанокompозитам физически легированным аллотропными формами углерода. Нами проведен анализ свойств не большого ряда нанокompозитов. В этой статье мы обобщили опыт, полученный в результате сравнения аналитических расчетов и экспериментальных исследований, проведенных различными авторами.

Исследование квантово-размерных эффектов, обусловленных физическим легированием нанокompозитов наноструктурами углерода, было впервые проведено в теоретических работах [8-11] на примере легирования нанокompозитов молекулами фуллеренов, обладающими большим сродством к свободным электронам. В экспериментах (см. обзор [20]) установлено, что до 6 электронов могут захватываться одной молекулой фуллерена. Согласно теоретическим представлениям о собственном энергетическом спектре эндоиона фуллерена [8-11], в этом случае может фокусиро-

ваться энергия до 30 эВ на один фуллерен. По косвенным данным в [7] в полупроводниках наблюдался захват до четырех электронов на один фуллерен. В [8-11] были открыты поляризационные квантово-размерные эффекты и согласно аналитическим оценкам при физическом легировании фуллеренами нанокompозитов, с характерными размерами ядра порядка 20 нм, может происходить упрочнение композита до 100 ГПа. Подтверждение эффекта упрочнения нанокompозитов физическим легированием металлов (меди и алюминия) фуллеренами было осуществлено в ряде работ [14, 15]. В этих случаях микротвердость возрастала до 10 раз (до 10 ГПа). При физическом легировании нанокompозитов меди наноструктурами графита были получены нанокompозиты с прочностью в 4 раза большей, чем исходные образцы [5, 16, 18]. Таким образом, физическое легирование фуллеренами для повышения микротвердости или сцепления частей нанокompозита эффективнее в разы, чем другими аллотропными формами нанокompозита. Это связано с кулоновским плавлением фуллерита в нанокompозите при перемешивании в мельницах [12].

Открытие концентрационно-поляризационного эффекта второго рода, описанное в [8-12], было подтверждено в экспериментах [7] (рис. 2), где удалось, применяя этот эффект, увеличить эффективность работы физически легированного молекулами фуллерена термоэлектрика на 30%.

В [3, 5, 12, 16, 18] при исследовании композитных покрытий, было установлено, что наличие наноструктур свободного углерода в композите вне зависимости от состава делает это материал устойчивым к износу. А, как установлено в [31], метод физического легирования нанотрубками, позволяет изменять проводимость исходного силоксана на 10 порядков.

Среди нанокompозитов особое место занимают материалы на базе оксидов и карбидов, обладающие высокой температурой плавления от 2580 °С – полукарбид молибдена до 3880 °С – карбид тантала, твердостью до 31 ГПа, износостойкостью, коррозионной устойчивостью, стойкостью по отношению к расплавленным металлам, малой упругостью паров и малой скоростью испарения. Особый интерес представляют исследования термических свойств нанокompозитных покрытий на базе карбидов и методов нанесения их на рабочую поверхность инструментов деталей машин. В чистом виде карбиды, как и оксиды, имеют повышенную хрупкость. Обычно для повышения их пластических свойств в состав карбидов вводят металлическую фазу

и измельчают зерно, затем их спекают. В принципе это тоже один из методов физического легирования материалов. Однако при длительном функционировании нанокompозита в устройстве нанокристаллы рекристаллизируются.

Нами для сохранения мелкозернистости металлов, карбидов, полупроводников, люминофоров при долгосрочной эксплуатации приборов на их базе предложен оригинальный метод физического легирования нанокристаллов композитов структурами из углерода, являющихся ловушками для свободных электронов. Структуры из углерода, поляризуясь, вытягивают на себя часть свободных электронов композита. Сами заряжаются отрицательно, а отдавшие свободные электроны нанокристаллы карбидов, заряжаются положительным зарядом (рис. 16). По этой причине положительно заряженные нанокристаллы карбидов не рекристаллизируются со временем [3, 11, 12].

Покрытия из нанокompозитов карбидов физически легированные наноструктурами графита имеют перспективу применения для режущего металлообрабатывающего и формообразующего инструментов, работающих на современных скоростных режимах резанья, прокатки и протяжки, повышающих производительность процесса обработки и существенно снижающих его себестоимость. Кроме того, эти покрытия имеют высокую совместимость с такими вязкими и пластичными металлами, как медь, алюминий и их сплавы, и могут быть использованы для защиты фильер и волок при протяжке проволок и для прокатных и калибровочных валков прокатных станков при получении листов и фольги из этих материалов.

В большинстве своем практически все карбидные композиты, полученные в [3] в результате физического легирования наноструктурами графита, обладали относительно низким коэффициентом трения, ниже 0,3. Среди этой группы аномально низкий коэффициент трения имели образцы серии Nb : C (50 : 50) – 0,13–0,16 при нагрузках на шарик $\varnothing 5$ мм из BK-8 до 100 Н.

Наряду с этим они обладают также и специфическими электрическими и тепловыми свойствами и могут быть использованы в качестве материалов нагревательных элементов высокотемпературных печей, высокотемпературных термопар и катодов термоэлектронных устройств [3], ТВЭЛов при добавлении урана [27] и т. д.

На примере измерения микротвердости карбидов, согласно экспериментам, выполненным в [3], установлено, что с повышением содержания нано-

структур графита возможно получение максимальной микротвердости, которая на 20–60% выше, чем для компактных материалов. Вместе с тем, эти твердые нанокompозиты имеют достаточно низкий коэффициент трения. Рост твердости материала, возможно, связан с рядом факторов [3]:

- увеличение протяженности границ зерен при ультрадисперсной и нанокристаллической структурах;
- изменением состава углерода и ростом карбидной фазы;
- ростом внутренних напряжений (сжатие);
- разделением объемного заряда и кулоновским обжатием наноструктурированного материала (рис. 16).

Физическое легирование нанокompозитов на базе карбидов переходных металлов позволило получить прочные (кулоновски обжатые, рис. 1) материалы с высокой микротвердостью до 30 ГПа, низким коэффициентом сухого трения до 0,13–0,16, с высокой термостойкостью до 3000° С и термостабильностью в нанокристаллическом состоянии более 1200 °С, с высокой износостойкостью с коэффициентом износа $< 10^{-17}$ м³/Нм [3].

В качестве современного инструмента для нанесения покрытий из карбидов без использования реакционных газов ацетилена, метана, пропана и др. (процесс взрывоопасный) является метод высокоскоростного ионно-плазменного магнетронного распыления – ВИПМР [3, 5, 12, 16, 18]. Этот метод позволяет осуществлять при определенных условиях (изменение плотности мощности плазменного разряда в диапазоне значений от 40 до 125 Вт/см²) совместное распыление из мозаичных мишеней различные композиции материалов, например: металл-графит, металл-карбид-графит, карбид-металл, карбит-графит и в широком диапазоне варьировать как составом (соотношением площадей занимаемых металлом, карбидом и графитом), так и дисперсностью кристаллической структуры, изменением мощности разряда. Скорости нанесения покрытий из карбидов и металлов методом ВИПМР при таких плотностях мощности распыления материалов (металла и графита) составляет 0,1 до 0,7 мкм/мин, что практически на порядок больше, чем при обычном магнетронном распылении (MRS-PVD) и вакуумно-дуговом распылении (ARC-PVD).

Этот метод позволяет практически перейти к иному механизму взаимодействия углерода и металлов при их распылении ионной бомбардировкой. Если при использовании газов образо-

вание карбидов происходит непосредственно на мишени и затем идет молекулярный перенос карбидов через распыление на подложку, то при ВИПМР из мозаичных мишеней идет совместное распыление атомов углерода и металла и взаимодействие между ними, как в потоке пара, так и на подложке. В этом случае мы можем получать не только карбиды, но и другие фазы, включая наночуглеродные и наноструктуры металла. Подтверждением этому является процесс нанесения композиционного покрытия металл-углерод, где металл не взаимодействует с углеродом, например: медь-углерод. Покрытие в этом случае имеет двухфазный состав, состоящий из наноструктур металла и фазы нанографита [5, 12, 16, 18].

Анализ результатов комплексного исследования фазового состава, структуры, механических и электрических свойств многофазных наноструктурированных композитов на основе карбидов металлов, полученных магнетронным распылением из составной (мозаичной) мишени при высокоскоростном режиме и плотности мощности разряда $> 40 \text{ Вт/см}^2$, показывает следующее [3].

1. Композиционные покрытия на основе карбидов переходных металлов с наноструктурой могут быть получены совместным распылением металла и графита из мозаичной мишени.
2. Высокоскоростной режим распыления материалов в диапазоне плотности мощности разряда от 37 до 125 Вт/см² позволяет варьировать фазовым составом, наноструктурой композита и его свойствами, включая механические: твердостью, износостойкостью и коэффициентом сухого трения.
3. Высокоскоростной режим распыления существенно влияет на динамику генерации парового потока и формирование в нем конденсата с образованием нескольких наноразмерных фаз: нанофаза на основе карбида, нанофаза на основе металла и нанофаза графита. Последняя присутствует во всех составах.
4. Влияние свободного углерода в виде нанографита на свойства композита значительно: снижает коэффициент трения, повышает износостойкость, повышает термическую стабильность, повышает прочность при высокой температуре, способствует получению материала с ультрадисперсной нанокристаллической структурой карбида и металла.

5. Процесс совместного распыления металла и графита значительно более простой, технологичный и экологически чистый по сравнению с процессом распыления металлов в атмосфере реакционных газов: ацетилена, метана, пропана и др.

Исследованный в работах [3, 5, 12, 16, 18] технологический процесс формирования нанокompозитного физически легированного наноструктурами углерода является прорывным. Во-первых, в нем, используя технику ВИПМР, можно распылять из одной мишени любые материалы, задавая их концентрацию простым соотношением площадей в зоне максимальной эрозии мишени. Во-вторых, любые карбиды и металлы, физически легированные наноструктурами углерода, можно получать простым совместным распылением металла и графита без подачи в рабочий объем камеры взрывоопасных газов. Они просто не нужны в данном процессе. В-третьих, управляя режимом распыления (плотностью мощности плазменного разряда) можно в широком диапазоне менять структуру и фазовый состав (содержание свободного аморфизированного графита) и соответственно управлять свойствами, например, твердостью, износостойкостью и коэффициентом трения, важнейших эксплуатационных характеристик композиционных покрытий на основе карбидов и металлов, таких как медь, алюминий и др.

Среди новых нанокompозитов особое внимание уделяется пленочным материалам, которые широко стали использоваться в последнее время для модификации рабочих поверхностей машин и механизмов, существенно повышая служебные характеристики большинства деталей и металлообрабатывающих инструментов. Повышение свойств поверхностных слоев материала деталей и улучшение контактных условий работы приводит к росту сроков их эксплуатации и, соответственно, к огромной экономии материалов и энергии.

Перечислим основные задачи, решенные в [3]:

1. Осуществлены:
 - а) выбор кандидатных материалов и их концентрации для слоев покрытий из карбидов переходных металлов, физически легированных наноструктурами углерода;
 - б) разработка и изготовление мишеней;
 - в) синтез методом магнетронного распыления покрытия из карбидов переходных металлов с различным относительным содержанием углерода, физически легирующим нанокристаллы карбидов;

- г) эксперименты и расчеты по установлению структуры нанозерен карбидов и состава межзеренных интерфейсных слоев – наноструктур углерода в распыляемых композитных мишенях и синтезированных слоях покрытия из карбидов переходных металлов с различным относительным содержанием углерода;
- д) оптимизация состава мишеней для формирования покрытия из карбидов переходных металлов с различным относительным содержанием углерода;
- е) разработка композитных многофазных мишеней, обеспечивающих стабильное магнетронное распыление, для магнетронного синтеза покрытия из карбидов переходных металлов с различным относительным содержанием наноструктур углерода.
2. Созданы физически легированные наноструктурами из углерода нанокompозиты из нанокристаллов карбидов переходных металлов и исследованы их свойства. Эти высокотемпературные наноструктурированные материалы на основе химических соединений переходных металлов IV–VI групп периодической системы элементов с углеродом представляют интерес, как с точки зрения фундаментальной науки, так и для создания современной техники 4+ и 5-го поколений. Среди этих соединений, как показали исследования, особое место занимают карбиды, обладающие высокой температурой плавления от 2580 °С – полукарбид молибдена и до 3880 °С – карбид тантала, твердостью до 30 ГПа, износостойкостью, коррозионной устойчивостью, стойкостью по отношению к расплавленным металлам, малой упругостью паров и малой скоростью испарения. Наноструктурированные композиты обладают комплексом свойств, важных для многих задач микро- и нанoeлектроники: высокая температура плавления, большая твердость, износостойкость, коррозионная устойчивость, стойкость по отношению к расплавленным металлам, малая упругость паров и малая скорость испарения, слабая рекристаллизация наноструктур. Эти свойства определяют высокую эффективность применения наноструктурированных наноструктурами из аллотропных форм углерода композитов, а значит, определяют научную и прикладную значимость метода физического легирования нанокompозитов.
3. Разработан метод получения и управления свойствами наноструктурированных композиционных многофазных покрытий (на основе карбидов переходных металлов) с высокой микротвердостью до 30 ГПа, низким коэффициентом сухого трения до 0,13–0,16, с высокой термостойкостью до 3000 °С и термостабильностью в нанокристаллическом состоянии более 1200 °С. Управление нанокристаллической структурой и свойствами карбидных композитных многофазных покрытий осуществлялось изменением концентрации в них свободного углерода с образованием в составе материала фазы аморфного нанографита. Установлено, что наличие нанографита в композите существенно повышает ударную вязкость и расширяет спектр возможных применений по сравнению с чистыми карбидами.
4. Разработан новый технологический процесс физического легирования наноструктурированных композитных материалов, являющийся прорывным и «зеленым» (экологичным). Во-первых, в нем, используя технику высокоскоростного ионно-плазменного магнетронного распыления (ВИПМР), можно распылять из одной мишени любые материалы, задавая их концентрацию простым соотношением площадей в зоне максимальной эрозии мишени. Во-вторых, любые карбиды можно получать простым совместным распылением металла и графита без подачи в рабочий объем камеры взрывоопасных газов. Они просто не нужны в данном процессе. В-третьих, управляя режимом распыления (плотностью мощности плазменного разряда) можно в широком диапазоне менять структуру и фазовый состав (содержание свободного аморфизированного графита) и соответственно управлять свойствами, например: твердостью, износостойкостью и коэффициентом трения, важнейших эксплуатационных характеристик композиционных покрытий на основе карбидов. При использовании технологии ВИПМР для нанесения карбидных и других углеродосодержащих композитов не будут применяться взрывоопасные газы и их смеси с водородом, в отличие от дру-

гих технологий, используемых при исследовании и производстве покрытий.

5. Разработана в [4, 8–12] и верифицирована экспериментами [3, 5, 14–18, 21–23] теория квантово-размерных эффектов, обусловленных захватом свободных электронов нанокристаллов легирующими наноструктурами, выполняющими функции ловушек для свободных электронов композита (на примере наноструктур из углерода).

Сейчас довольно сложно говорить о возможных реализациях коммерческих сетей 5G при условии, что пока даже не введен общий стандарт и имеется мощное противодействие со стороны США, сдерживающих развитие Китая. Но производители в Китае взяли за сети нового поколения очень резко. Их разработки даже опережают выход стандарта. Если компаниям, участвующим в этом проекте, удастся добиться поставленных целей и договориться о сотрудничестве, то весь мир сможет получить единую, стабильную, конвергентную и высокодоступную сеть нового поколения. Представители Международного союза электросвязи заявляют свои надежды на то, что 5G станет точкой в развитии беспроводных сетей. Полагается, что существенной переделки архитектуры не будет, и нас ждет лишь минорная доработка радио части, включающей в том числе и исследования, разработку и применение технологии не только химически легированных композитов, но и внедрение физического легирования в производство технологически новых нанокompозитов в практику. Такое внедрение необходимо, начиная с электронной (для различных компьютеров, мобильных и др. гаджетов) и обрабатывающей промышленности, где нужны сверхпрочные температурноустойчивые материалы и кончая атомной промышленностью, где существенна роль надежности и безопасности функционирования рабочих устройств, которую можно существенно повысить, применяя физическое легирование ТВЭЛов и их покрытий наноструктурами углерода [27]. В данной работе исследованы основы механизма образования прочной связи между физически легированными кристаллами и наноструктурами углерода и осуществлен выбор оптимальных композиций и состава покрытия для элементов наноэлектроники и оптоэлектроники. Метод физического легирования, разработанный авторами [3, 8–12, 16–18], не имеет мировых аналогов и, несомненно, будет применяться для решения задач наноэлектроники и оптоэлектроники.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 18-07-00897 А и 19-07-01005 А).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Малоземов С.** <http://chudo.tech/2019/01/29/5g-mobile/>
2. https://nedradv.ru/nedradv/ru/page_news/?obj=d63bd630c3a0d64877dd8a1ea4f64c75
3. **Высикайло Ф.И., Митин В.С., Беляев В.В.** Физическое легирование для управления нанокристаллической структурой и свойствами многофазных композитных металл-углеродных покрытий на базе карбидов // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*. 2018. № 3(171). С. 44–58.
4. **Vysikaylo P. I.** Physical Fundamentals of Hardening of Materials by Space Charge Layers. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010. 46(4). PP. 291–298. Ресурс доступа: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375510040010>.
5. **Vysikaylo P. I., V. S. Mitin, A. A. Markin, A. Yu. Yakovlev, V. V. Belyaev.** Cooper-Carbon Nanostructured Composite Coatings with Controlled Structure // *Open Journal of Applied Sciences*, 2016, 6, 195–207. DOI: 10.4236/ojapps.2016.63021 Google-based Impact Factor: 0,34.
6. **Larry A Burchfield, Mohamed Al Fahim, Richard S Wittman, et al.** Novamene: A new class of carbon allotropes. *Heliyon*, 2017, Ресурс доступа – <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00242>.
7. **Blank V., Vysikaylo P. et al.** C₆₀ - doping of Nanostructured Bi-Sb-Te Thermoelectrics. *Phys. Status Solidi A*. 2011. 208. PP. 105–113.
8. **Vysikaylo P.** Cumulative Quantum Mechanics (CQM). Part I: Prerequisites and Fundamentals of CQM // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 2012. 48. № 4. P. 293–305. DOI 10.3103/S1068375512040187.
9. **Vysikaylo P.** Cumulative Quantum Mechanics (CQM). Part II. Application of Cumulative Quantum Mechanics in Describing the Vysikaylo Polarization Quantum Size Effects // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 2012. 48. № 5. P. 395–411. DOI: 10.3103/S1068375512050158.
10. **Высикайло Ф.И.** Самоорганизующиеся кумулятивно-диссипативные наноструктуры в легированных кристаллах. Парадоксы в квантовой механике и их решение на базе кумулятив-

- ной квантовой механики // Инженерная физика. 2013. № 3. С. 15–48.
11. **Высикайло Ф.И.** Поляризация аллотропных полых форм углерода и ее применение в конструировании нанокompозитов // Нанотехника. 2011. Т. 1. № 25. С. 19–36.
 12. **Высикайло Ф.И., Беляев В.В., Митин В.С.** Нарушение электронейтральности в нанокompозитах. – М.: Издательство РУДН, 2019. 268 с.
 13. **Высикайло Ф.И., Беляев В.В.** Методика экспериментально-расчетного определения профиля и локальных значений относительной диэлектрической проницаемости акцепторно-легированных кристаллов по рамановским спектрам // Методика № ГСССД МЭ 256–2016, зарегистрирована во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологической службы ФГУП «ВНИИМС» (протокол НТС № 3 от 2 декабря 2016 г.).
 14. **Medvedev V. V., Popov M. Y., Mavrin B. N., Denisov V. N., Kirichenko A., Tatyatin E. V., Ivanov L. A., Aksenenkov V. V., Perfilov S. A., Lomakin R. and Blank V. D.** Cu-C₆₀ nanocomposite with suppressed recrystallization. *Applied Physics A*, 105 (2011), 45–48. DOI: 10.1007/s00339-011-6544-4 (2011).
 15. **Zameshin A., Popov M., Medvedev V., Perfilov S., Lomakin R., Buga S., Denisov V., Kirichenko A., Skryleva E., Tatyatin E., Aksenenkov V., Blank V.** Electrical conductivity of nanostructured and C₆₀-modified aluminum. *Applied Physics A*, 107 (2012), 863–869, DOI: 10.1007/s00339-012-6805-x.
 16. **Maniks J., Mitin V., Kanders U. et al.** Deformation behavior and interfacial sliding in carbon/copper nanocomposite films deposited by high power DC magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 276. PP. 279–285.
 17. **Sychoy M. M., Mjakin S. V., Ogurtsov K. A., Rozhkova N. N., Belyaev V. V., Vysikaylo P. I., Nakanishi Y., Ringuede A.** Effect of shungite nanocarbon deposition on the luminescent properties of ZnS: Cu particles. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. Vol. 519. PP. 19–24.
 18. **Высикайло Ф.И., Митин В.С., Яковлев А.Ю., Беляев В.В.** Модификация свойств наноструктурированных медь-углеродных композитных покрытий // *Электронная техника* I. Серия 3. Микроэлектроника. 2017. № 1(165). С. 18–33.
 19. **Высикайло Ф.И.** Периферийные кулоновские силы, классические и квантовые мембраны, фокусирующие плазмиды (обзор) // *Успехи прикладной физики*. 2015. Т. 3. № 5. С. 471–478.
 20. **Reed C. A., Dolskar R. D.** Discrete Fulleride Anions and Fullerenium Cations // *Chem. Rev.* 2000. Vol. 100. P. 1075–1120.
 21. **Туктаров Р.Ф., Ахметьянов Р.Ф., Шиховцева Е.С., Лебедев Ю.А., Мазунов В.А.** // *ЖЭТФ*. 2005. Т. 81(4). С. 207–211.
 22. **Jaffke T., Illenbergen E., Lezius M., Matejckik S., Smith D., Mark T. D.** // *Chem. Phys. Lett.* 1994. 226. P. 213–218.
 23. **Huang J., Carman H. S. and Compton R. N.** // *J. Phys. Chem.* 1995. 99. P. 1719–1726.
 24. **Маргулис М.А.** Сонолюминесценция // *УФН*. 2000. Т. 170. № 3. С. 263–287.
 25. **Дракон А.В., Емельянов А.В., Еремин А.В., Петрушевич Ю.В., Старостин А.Н., Таран М.Д., Фортов В.Е.** Влияние квантовых эффектов на инициирование воспламенения и детонации // *ЖЭТФ*. 2014. Т. 145. Вып. 5. С. 943.
 26. **Старостин А.Н., Грязнов В.К., Петрушевич Ю.В.** Развитие теории распределения частиц по импульсам с учетом квантовых эффектов // *ЖЭТФ*. 2017. Т. 152. Вып. 5 (11). С. 1104–1112.
 27. **Якушкин А.А., Высикайло Ф.И.** Проблемы разрушения поверхности оболочек тепловыделяющих элементов ядерных энергетических установок // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика*. 2018. № 4. С. 92–111.
 28. **Сидоров Л.Н., Юровская М.А., Борщевский А.Я., Трушков И.В., Иоффе И.Н.** Фуллерены: учеб. пособие. – М.: Экзамен, 2005.
 29. **Vysikaylo P. I.** // *Plasma Science, IEEE Transactions on* V. 42 (12), 3931–3935. 2014.
 30. **Высикайло Ф.И.** // *Успехи прикладной физики*. 2015. Т. 3. № 5. С. 471–478.
 31. **Мащенко В.И., Константинов М.С., Цебрук И.С., Чаусова О.В., Беляев В.В.** Новые электропроводящие нанокompозиты на основе силоксановых материалов // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика*. 2019. № 1. С. 57–67.

Микросистемы для бортового искусственного интеллекта

► Н. С. Данилин¹, Д. М. Димитров², И. Х. Сабилов²

¹АО «РКС», ²ООО «Космос Комплект»

Современные космические аппараты уже повсеместно используют системы искусственного интеллекта (ИИ) из-за реализации принципа автономного функционирования и связанного с ними ситуационного управления внештатными ситуациями, а также для решения вопросов разработки адаптивной и интеллигентной полезной нагрузки. Наземные системы контроля и управления также нуждаются в интегрировании систем ИИ для осуществления соответствующих обменных взаимодействий с интеллектуализированными бортами. В работе рассмотрена проблематика микросистем ИИ для создания интеллектуальных бортовых систем с применением технологии систем в корпусе.

Microsystems for On-Board Artificial Intelligence

N. S. Danilin¹, D. M. Dimitrov², I. H. Sabirov²

¹ RSS JSC, ² LLC "Cosmos Complect" Ltd.

The artificial intelligence (AI) systems are widely used on the board today because of the necessity to provide autonomous satellite functioning and closely connected with it free-lance flight situations control and also in order to design more adaptive and intelligent payload subsystems. The ground control infrastructures also need AI implementation to communicate correspondently with such satellites. The microsystems for on-board applications issues in the context of systems in package are discussed in the present article.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сегодня искусственный интеллект (ИИ) является авангардной технологией для широкого класса приложений, в том числе и в космической промышленности [1]. Технические решения на базе этой технологии находятся в основе многих инновационных систем и инженерных стратегий. Несмотря на «внешние оболочки» конкретного ИИ-решения – реализация алгоритма, обработка больших массивов данных, инновационная компьютерная архитектура и т. п., суть всегда в физической реализации, то есть в применяемых микросхемах или микросистемах, которые составляют класс микросистем искусственного интеллекта (МИИ). Разработка МИИ является естественным развитием тематики систем в корпусе и находится в основе реализации и продвижения систем ИИ в условиях современной четвертой индустриальной революции.

Список прикладных технологий ИИ достаточно обширный, но важнейшие из них, которые находят применение на борту космических аппаратов следующие:

- компьютерное зрение;
- распознавание речи;
- семантический анализ;
- графы знаний;
- человеко-машинные интерфейсы;

- автономные системы;
- проблемно-ориентированные технологические системы;
- гибридные интеллигентные системы;
- системы виртуальной реальности.

К классу МИИ сегодня в основном относятся три типа микросистемы [2]:

- универсальные микросистемы, которые могут быть приспособлены для ИИ-приложений за счет интеграции стандартных микросхем и проблемно-ориентированного программного обеспечения и/или аппаратных средств;
- специализированные микросистемы, направленные на машинное обучение (нейронные сети и глубинное обучение);
- нейроморфные микросистемы, имитирующие функционирование человеческого мозга.

Целью настоящей работы является рассмотрение и анализ проблематики МИИ для создания интеллигентных бортовых систем для космических аппаратов, с применением технологии систем в корпусе.

2. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМАТИКИ МИИ

В настоящее время в мировой практике еще нет принятого стандарта и даже точного определения в связи

с МИИ. В широком смысле все микросистемы применяемые для реализации технических решений ИИ можно определять как МИИ. Так, например, стандартные микросхемы в комбинации с аппаратными и программными модулями, выполнены в конструктиве систем в корпусе, широко применяются в системах ИИ. Так как ИИ-приложения весьма разнообразны и специфические, то можно определить только некий общий подход к проектированию МИИ на базе практической методологии разработки систем в корпусе [3]. В связи с этим технические решения в области МИИ достаточно наукоемкие и требуют привлечения коллектива разработчиков со специализациями в различных областях, таких как программирование, микроэлектроника, технология и новые материалы.

Технико-экспертная среда, в которой разрабатываются МИИ, комплексная и неоднородная. Она включает ИИ-приложения, алгоритмы для их реализации, аппаратуру и технологии и представлена обобщенной схемой на рис. 1.

2.1. Особенности компонентой базы МИИ

Большинство инноваций в микроэлектронике вызваны либо потребностями рынка, либо «узкими местами» конкретной технологии. В этом плане МИИ и связанные с ними технологии не являются исключением. Прежде всего системы ИИ требуют нового подхода к вычислениям, то есть необходима оптимизация классической архитектуры фон Неймана в плане организации обмена между памятью с данными и процессорными элементами, а также и по отношению гибкой проблемной ориентации самих вычислителей.

ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Во всех ИИ вычислительных системах микросхемы выполняют физически все операции, а программное обеспечение (ПО) является ядром их организации. ПО реализует алгоритм ИИ-системы, что выражается в выполнении набора задач с разными параметрами. Даже один и тот же ИИ-алгоритм в разных случаях будет отличаться от предыдущих его реализаций в связи с разными условиями выполнения, как, например, точность вычислений, ограничительные условия, требуемая эффективность и т. п. Поэтому МИИ должны динамически изменять свою функциональность в режиме реального времени и в определенных заданных границах. Такие МИИ определяются как проблемно-ориентированные.

Универсальные процессоры, такие как стандартные процессоры (CPU) и графические процессоры (GPU), в комбинации с соответствующей памятью и в режиме небольшого потребления энергии могут быть исполь-

зованы для разработки проблемно-ориентированных вычислителей [4, 5]. В то же время заказные микросхемы (ASIC), которые уже являются схемами с фиксированной функциональностью, не обладают возможностью гибкой перестройки. ПЛИС можно реконфигурировать (перепрограммировать), но это потребует много времени и соответственно расходов. Вместе с этим большая избыточность логики в ПЛИС приводит к существенному потреблению энергии.

Технология реконфигурируемых вычислений (RV) позволяет изменять аппаратную архитектуру и функциональность программным путем. В этом заключается буду-

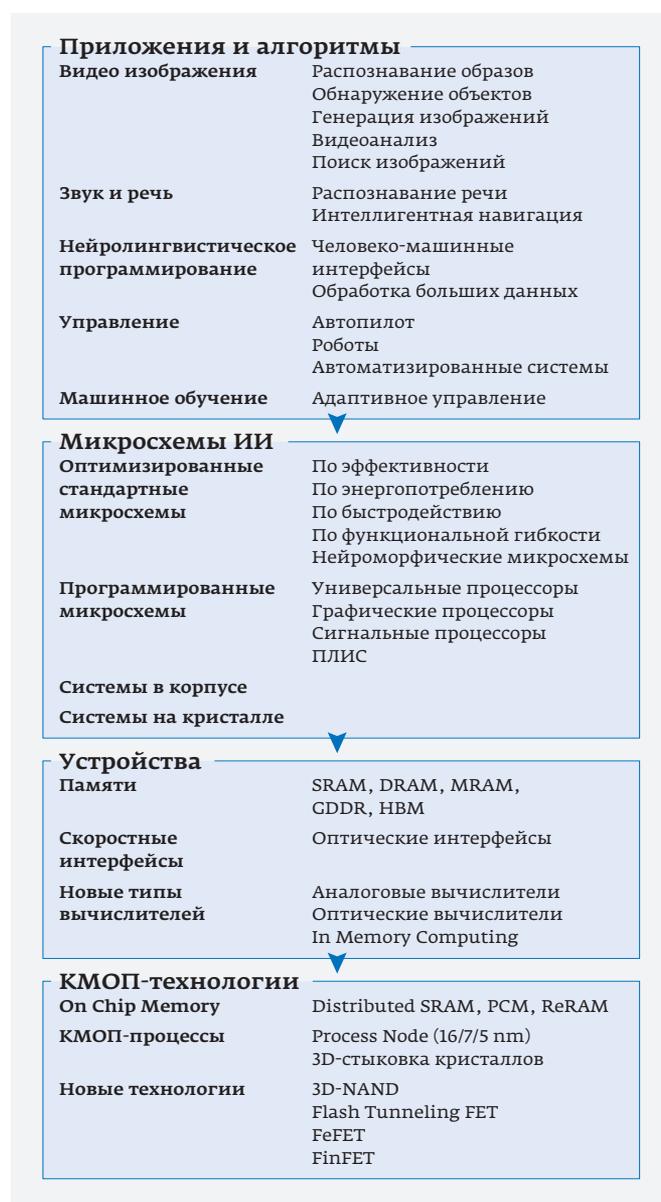


Рис. 1. Обобщенная схема технико-экспертной среды для разработки МИИ

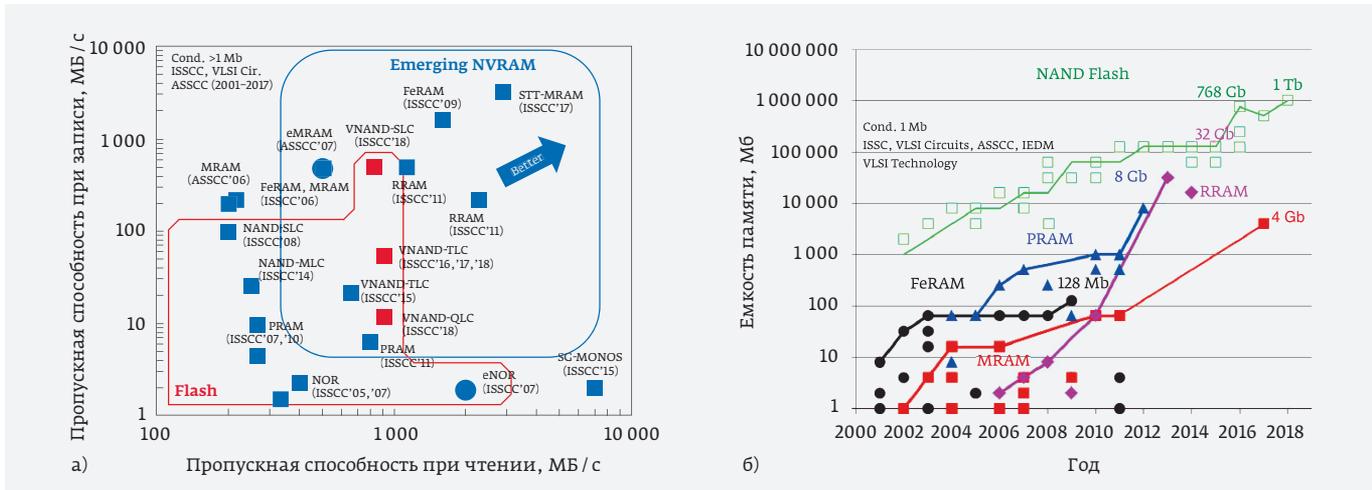


Рис. 2. Перспективы для МИИ памяти: а – пропускная способность, б – емкость

щее развитие гибких, энергоэффективных проблемно-ориентированных бортовых вычислителей.

Практически применяются три направления реализации РВ [6]:

- Реконфигурация однородного массива вычислительных модулей. Каждый из модулей может быть перестроен на конкретные функции из заданного набора, в зависимости от конкретных требований ИИ-алгоритма.
- Реконфигурация пропускной способности поля памяти. Маршрутизация данных в системе осуществляется при помощи изменения пропускной способности иерархической структуры памяти.
- Реконфигурация разрядности слова. Практически 16-разрядные слова удовлетворяют требования по точности широкого класса ИИ-алгоритмов, но для ИИ-сценариев с требованиями о невысокой точности, удобно использовать 8-разрядные слова.

Разработка РВ МИИ является процессом сопроектирования, то есть совместного проектирования аппаратуры и ПО. При этом уровень вложения ПО сводится не только к функционалу МИИ, но также связан с ее аппаратурными параметрами, такими как точность, быстродействие, энергопотребление и др. [7].

ПАМЯТИ ДЛЯ МИИ

Ключевой фактор для достижения эффективности вычисления и снижения энергопотребления в МИИ – это маршрутизация доступа к данным в структурах памяти. При использовании конвенциональных фоннеймановских архитектур данные последовательно загружаются и обрабатываются в рабочей памяти, в результате чего значительно увеличиваются системные задержки и потребление энергии. В связи с этим развивается

направление МИИ ориентированные памяти. Перспективные модули памяти с возможностями «вычисления в памяти» (in-circuit-computing) в большой степени помогут избежать неэффективности архитектур фон Неймана [8]. Развитие технологии мимистров значительно ускорит разработку нейроморфических вычислительных схем.

В связи с необходимостью реализации параллельного доступа к большим массивам данных требуются памяти с большой пропускной способностью и большой емкостью. На рис. 2 (ISSCC Trend, 2018) представлено текущее состояние перспективных с точки зрения разработки МИИ типов памяти.

Самые широко применяемые для хранения больших объемов данных на сегодняшнем этапе развития МИИ – это DRAM и NAND Flash памяти, которые интегрированы в 3D-структурах на основе стыковки кристаллов при помощи технологии вертикальных кремниевых перемычек. На таких «кубах» памяти вместе с быстродействующими графическими процессорами (GPU), как микросистемы в корпусе, выпускаются вычислители для разнообразных ИИ-приложений [9] (рис. 3).

SRAM, DRAM, PCM из-за своей интерфейсной совместимости с разными логическими устройствами находят основное применение в современных МИИ. В случаях, когда требуется энергонезависимые памяти, исполь-

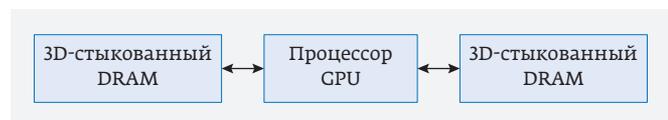


Рис. 3. Вычислительная микросистема для ИИ-приложений

Таблица 1.

Параметр	SRAM	DRAM	NAND Flash	NOR Flash	PCM*	STT-MRAM**	ReRAM***
Потребление при записи	Низкое	Низкое	Высокое	Высокое	Среднее	Среднее	Среднее
Потребление при чтении	1 нс	5 нс	>100 мкс	10 мкс – 1 мс	100–150 нс	2–200 нс	10–100 нс
Задержка при чтении	1 нс	20–80 нс	5–200 мкс	50 нс	50 нс	1,5–25 нс	3–200 нс
Возможность программирования	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Хорошая	Средняя	Слабая	Средняя
Число циклов запись/чтение	Без лимита	Без лимита	E4-E5	E4-E5	E8-E9	E15	E5-E10
Размер топологической ячейки****	100F ²	7F ²	4F ²	10F ²	4F ²	12F ²	4–6F ²

* PCM – Phase Change Memory; ** STT-MRAM – Spin Transfer Torque MRAM; *** ReRAM – Resistive RAM (Memistor);

**** F – Feature size (половина расстояния между ячейками DRAM)

зуются MRAM, STT-MRAM, ReRAM, NJR/NAND Flash. В табл. 1 представлены основные параметры перспективных с точки зрения МИИ типов памяти.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы искусственного интеллекта в космических аппаратах связаны прежде всего с их автономизацией. В этой связи следует упомянуть первые в мире отечественные системы автоматизированной стыковки «Игла» («Союз Т») и «Курс» («Союз ТМ» и «Прогресс М»). Они использовали радары для определения дистанций и вычисляли в реальном времени текущее позиционирование при помощи характеристик сигналов между радарными антеннами.

В 90-х годах JPL (США) запустила автономные аппараты Mars Pathfinder и Sojourner Rover. В 1999 году аппарат Deep Space One был укомплектован системой ИИ Remote Agent Experiment, которая, помимо автономной навигации, обеспечивала и обработку внештатных ситуаций на борту. В 2003 году на Earth Observing-1 была установлена новая система ИИ Autonomous Sciencecraft Experiment с возможностями регенерирования плана миссии с применением ПО Casper. В этом же году JAXA (Япония) запустила аппарат Hayabusa, который в 2005 году произвел первую автономную посадку. В 2003 году были запущены два ровера Spirit и Opportunity (NASA) с полной автономизацией. В 2004 году ESA (ЕС) запустила аппарат Roseta, который был полностью автономный. В 2005 году NASA сделала попытку по проекту DART реализовать автономную «встречу» в космосе, которая закончилась неудачей. В 2007 году NASA по проекту DARPA провела автоматическую стыковку и расстыковку двух автономных аппаратов – Astro и NexSat.

В мировой практике существует еще множество примеров адаптированных систем ИИ в космических аппа-

ратах разного назначения. Реализованные при этом технические решения отличаются уникальностью, дороговизной и сложным ПО в основном по причине отсутствия подходящей для создания систем ИИ компонентной базы. Выпуск МИИ позволит с наличной микросхемотехникой и в рамках технологии микросистем в корпусе решать качественно и с небольшими затратами вопросы разработки бортовых систем ИИ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

2. **Straub J.** A Review of Spacecraft AI Control Systems, JSU, USA, 2014.
3. AI Chip Technologies 2018, ICFC, China, 2018.
4. **Данилин Н.С., Димитров Д.М., Димитров М.Д., Сабиров И.Х.** Практическая методология разработки микросистем в корпусе. – М., 2019.
5. **Theis T.N., et al.** The End of Moore's Law: A New Beginning for Technology // IEEE Computing in Science & Engineering. 2017. P. 19. or Information
6. What is GPU Computing, White Paper, MIT AT Space Lab, 2017.
7. **Yin S., et al.** A high Energy Efficient Reconfigurable Hybrid Processor for Deep Learning Applications // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018. P. 53.
8. **Sabry A., et al.** Energy Efficient Abundant Data Computing, IEEE Computer, 2015. P. 48.
9. **Chi C., et al.** PRIME: A Novel Processing-in-Memory Architecture in ReRAM-Based Memory, Proc. ISCA, 2016.
10. **Jeddeloh, et al.** Hybrid Memory Cube: New DRAM Architecture Increases Density and Performance, VLSI, 2012.

Исследование параметров транзисторов, изготовленных по технологии КМОП КНИ, рефлектометрическим методом

► В. П. Тимошенко¹, А. И. Хлыбов¹, Д. В. Родионов¹, Н. А. Шелепин², А. В. Селецкий²

¹НИУ «МИЭТ», ²АО «НИИМЭ»

В работе продемонстрирована возможность рефлектометрического метода для исследования параметров n-МОП-транзистора. Проведены измерения параметров n-МОП-транзистора в динамическом режиме (входная и проходная емкости, выходная проводимость, крутизна транзистора). Измерены и рассчитаны динамические характеристики транзистора, такие как максимальная частота усиления по току и время задержки.

CMOS-SOI Transistor Parameters Research Using Reflectometry Method V. P. Timoshenkov¹, A. I. Khlybov¹, D. V. Rodionov¹, N. A. Shelepin², A. V. Seletskiy²

¹MIET, ²MERI SC

This paper shows the possibility of reflectometry approach for n-MOSFET transistor parameters research. Transistor parameters measurement was done in dynamic mode (input and transition capacitances, output conductance, transconductance). Transistor dynamic parameters (f_T , delay time) were measured and analytically calculated.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие КМОП элементной базы предполагает определение статических и динамических параметров моделей МОП-транзисторов с высокой точностью в широком диапазоне входных воздействий. Существенное уменьшение топологических норм, а также появление новых конструкций полевых приборов привело к значительному повышению рабочих частот в область СВЧ, а следовательно входные/выходные емкости элементов уменьшились. Кроме этого важную роль играет определение параметров модели МОП-приборов или другого элемента интегральной схемы непосредственно в его рабочем режиме. В связи с этим рефлектометрический метод исследования и определения параметров активной и пассивной элементной базы, а также паразитных компонентов актуален. Особенностью метода является воздействие импульса напряжения с коротким фронтом (менее 10 пс) на исследуемый прибор и анализ его ответной реакции.

Высокая разрешающая способность современных технических средств позволяет делать измерение временных параметров, таких как задержка, длительность импульса, длительность фронта в диапазоне десятка пикосекунд с точностью до единиц пикосекунд, что дает возможность прямых измерений времени переключения СВЧ-транзисторов

и входных/выходных импедансов в СВЧ-диапазоне до 40 ГГц.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема эксперимента для исследования приборов и СВЧ-трактов рефлектометрическим методом приведена на рис. 1. В качестве измерительного прибора использовался стробоскопический осциллограф компании Keysight (модель 86100D), оснащенный блоком рефлектометра (модель N1055A). Прибор позволяет формировать перепады напряжения амплитудой $E=200$ мВ с минимальной длительностью фронта 6 пс. Возможны исследования объектов по реакции на проходной (V_{Trans}) и на отраженный (V_{Ref}) сигналы. В первом случае результатом будет измерение полосы пропускания устройств, коэффициентов усиления и потерь на прохождение сигнала. Во вто-

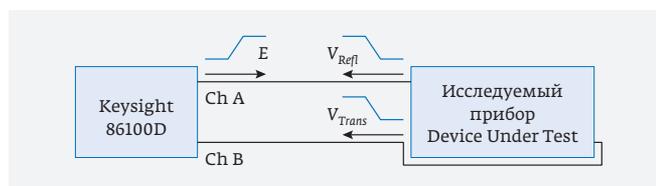


Рис. 1. Структурная схема исследования приборов и СВЧ-трактов рефлектометрическим методом

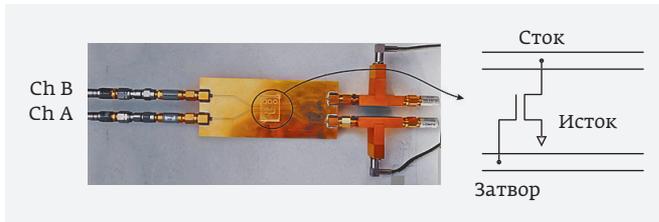


Рис. 2. n-МОП-транзистор на СВЧ печатной плате

ром случае возможны измерения импедансов трактов ввода-вывода интегральных схем, измерения реактивностей входных, выходных цепей и отдельных компонентов ИМС [1].

Для исследования параметров приборов (интегральных емкостей, индуктивностей, сопротивлений) рефлектометрическим методом использована печатная плата с СВЧ копланарными линиями передачи сигналов (материал – фольгированный Rodger). На плату был смонтирован изготовленный по технологии «кремний на изоляторе» кристалл с n-МОП-транзистором, имеющем длину затвора $L_g=0,18$ мкм и общую ширину $W=108$ мкм ($w=1,8$ мкм, $n=60$).

Затвор и сток транзистора соединены проволочными выводами с линиями передачи, а исток с землей (рис. 2).

Как видно из рисунка, на плате выполнены две копланарные линии с волновым сопротивлением 50 Ом, которые с обеих сторон соединены с SMA разъемами. Полоса пропускания полученной системы составляет 26 ГГц. В центральной части платы копланарные линии сходятся на минимально возможное расстояние, исключая взаимное влияние сигналов в этих линиях друг на друга. Минимальное расстояние между линиями передачи необ-

ходимо, чтобы уменьшить длины проволочных соединений между контактными площадками транзистора и линией передачи. Исследуемый объект располагался строго в центре между копланарными линиями на одинаковом расстоянии от разъемов, чтобы обеспечить равные электрические длины от кристалла до каждого из 4-х разъемов. Это позволило не учитывать длины соединений при исследовании динамических параметров.

ИЗМЕРЕНИЕ ВХОДНОЙ И ПРОХОДНОЙ ЕМКостей ТРАНЗИСТОРА

Электрические схемы исследуемого объекта, включающего определяемые параметры, приведены на рис. 3а для холодного ($V_d=V_s=0$) и на рис. 3б активного режимов транзистора.

При измерении входной и проходной емкости транзистора использована схема включения, показанная на рис. 4.

Измерительная система содержит дополнительные блоки, обеспечивающие задание рабочих режимов транзистора (Bias tee), а также развязку входов рефлектометра от постоянной составляющей (DC-block).

Осциллограммы отраженного и проходного сигналов при измерении входной и проходной емкости в холодном режиме (постоянные значения напряжения на затворе и стоке равны нулю) показаны на рис. 5.

Определение входной емкости осуществлялось путем подсчета площади под отраженным сигналом в соответствии с выражением [1]:

$$C_{in} = -\frac{2}{ZE} \int_0^{\infty} V_{Ref} dt, \quad (1)$$

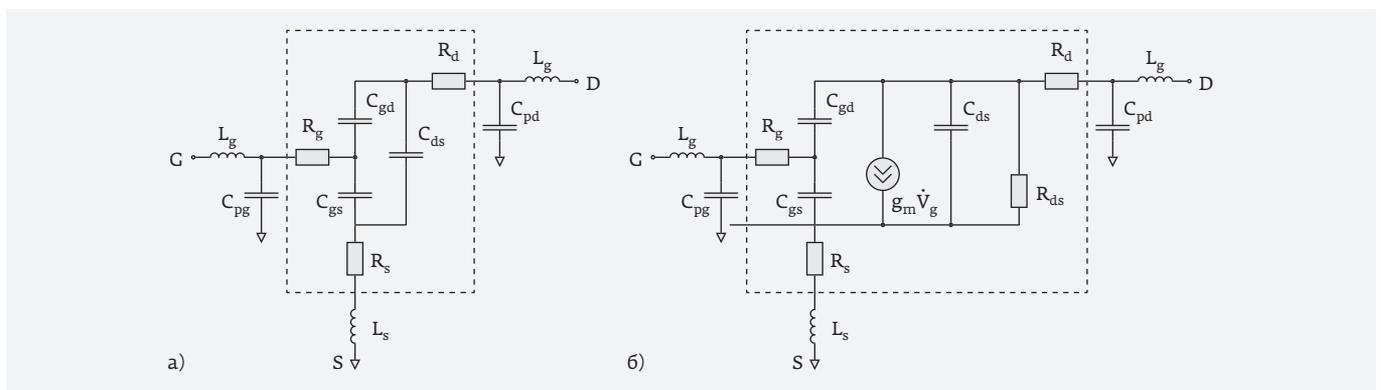


Рис. 3. Электрическая схема исследуемого объекта: а – холодный режим, б – активный режим. L_g, L_d, L_s – индуктивности в цепи затвора, стока и истока соответственно; C_{pg} и C_{pd} – емкости контактных площадок затвора и стока; C_{gs}, C_{gd}, C_{ds} – емкости затвор-исток, затвор-сток и сток-исток; R_{ds} – выходное сопротивление; g_m – крутизна

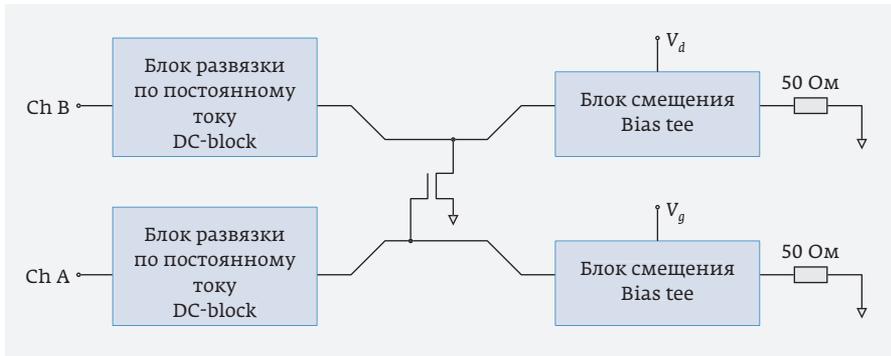


Рис. 4. Схема включения при измерении параметров транзистора

где Z – волновое сопротивление копланарной линии, E – амплитуда зондирующего сигнала, V_{Ref} – амплитуда отраженного сигнала.

Выражение (1) справедливо для копланарной линии бесконечной длины. На практике обычно можно ограничиться интервалом времени, соответствующим 1,5 периодам колебательного процесса, при этом в пределах данного интервала копланарная линия не должна иметь других неоднородностей. В связи с этим выражение (1) принимает вид:

$$C_{in} = -\frac{2}{ZE} \int_{T_1}^{T_2} V_{Ref} dt, \quad (2)$$

здесь T_1 - T_2 – интервал интегрирования (выделен на осциллограммах серым фоном).

Входная емкость определяется по отраженному сигналу автоматически с использованием аппаратно-программных средств стробоскопического осциллографа.

Для определения проходной емкости предложена следующая методика, основанная на анализе про-

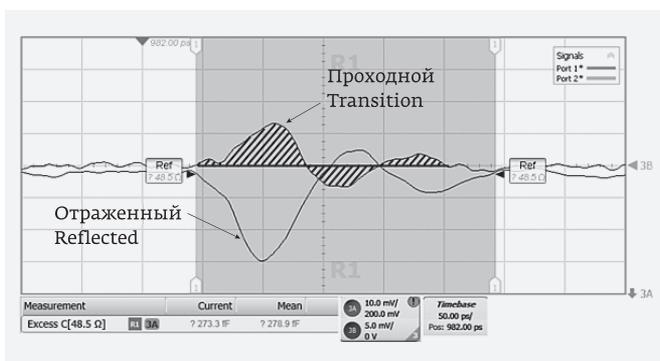


Рис. 5. Осциллограммы отраженного и проходного сигналов при измерении входной и проходной емкости в холодном режиме ($V_g=0,0$ В; $V_d=0,0$ В)

ходного сигнала, формирующегося на копланарной линии, соединенной со стоком транзистора (рис. 2). Эквивалентная схема для анализа проходного сигнала в соответствии с правилом эквивалентной волны [3] для используемой конструкции печатной платы показана на рис. 6.

Z – волновое сопротивление копланарной линии, C_{trans} – проходная емкость, $E=0,2$ В – амплитуда входного импульса, C_p – емкость, включенная парал-

лельно измерительной системе (емкость контактных площадок и металлизации), $Z_{in}=50$ Ом – входное сопротивление измерительной системы.

Амплитуда сигнала V_{trans} на входе измерительной системы (рефлектометра) определяется из выражения:

$$V_{trans} = \frac{Z_{in}Z}{Z_{in}+Z} \left(C_{trans} \frac{dV_{gd}}{dt} - C_p \frac{dV_{Cp}}{dt} \right), \quad (3)$$

где V_{gd} – напряжение на проходной емкости, V_{Cp} – напряжение на емкости C_p . Отсюда выражение для интеграла имеет вид:

$$\int_0^{\infty} V_{trans} dt = \frac{Z_{in}Z}{Z_{in}+Z} \left(\int C_{trans} dV_{gd} - \int C_p dV_{Cp} \right). \quad (4)$$

В начале переходного процесса напряжение V_{gd} и V_{Cp} равны нулю, а по его завершению V_{gd} достигает максимального значения $V_{gd}=E$, а V_{Cp} снова обращается в ноль, отсюда:

$$\int_0^{\infty} V_{trans} dt = C_d E \frac{Z_{in}Z}{Z_{in}+Z}, \quad (5)$$

учитывая, что $Z_{in}=Z$, получаем:

$$C_{trans} = \frac{2}{ZE} \int_0^{\infty} V_{trans} dt. \quad (6)$$

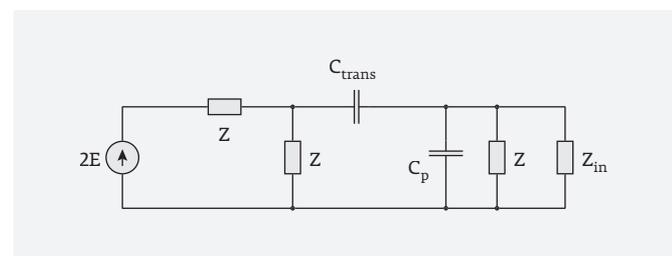


Рис. 6. Эквивалентная схема для анализа проходного сигнала

Необходимо отметить, что при интегрировании правой части выражения (3) второй член становится равным нулю, следовательно емкости, включенные параллельно измерительной системе, которыми являются паразитные емкости контактных площадок и металлизации разводки, не влияет на результаты измерений. Аналогичным образом можно показать, что последовательная индуктивность и сопротивление также не оказывают влияния. Наличие перечисленных элементов приводит только к изменению формы сигнала, однако не влияет на площадь под ним. Это объясняется тем, что площадь под сигналом связана с зарядом на емкости, который определяется только величиной емкости и напряжением на ней. Таким образом проходная емкость составляет емкость «затвор – сток» транзистора (C_{gd}).

Аналогичная ситуация при измерении входной емкости. Здесь также последовательная индуктивность и сопротивление не влияют на результат измерений. Однако емкость контактной площадки и металлизации на землю в цепи затвора входят в измеренную величину емкости, то есть $C_{in} = C_{gs} = C_{gd} = C_{pg}$. Для определения емкости «затвор – исток» изменена конструкция исследуемого объекта, в которой исток того же кристалла транзистора соединили с копланарной линией, сток с землей, а соединение затвора с копланарной линией осталось без изменения. Для полученной конструкции проходная емкость есть емкость «затвор – исток» (C_{gs}). Используя полученные результаты измерений определяем емкость контактной площадки и металлизации в цепи затвора:

$$C_{pg} = C_{in} = C_{gs} = C_{gd}. \quad (7)$$

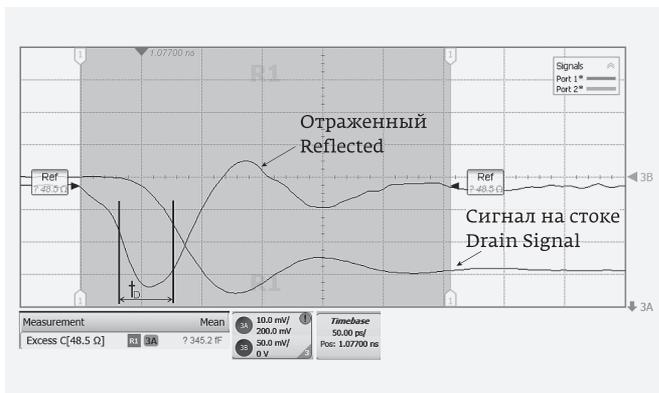


Рис. 7. Осциллограммы отраженного сигнала и сигнала на стоке транзистора при измерении входной емкости и задержки в рабочей точке ($V_g=1,6$ В; $V_d=1,8$ В)

Значения емкости контактной площадки и металлизации использовались в дальнейшем при определении емкости «затвор – исток» транзистора в активном режиме.

Осциллограмма отраженного сигнала при измерении входной емкости для включенного транзистора (напряжение на затворе $V_g=1,6$ В, напряжение на стоке $V_d=1,8$ В) показаны на рис. 7.

При определении проходной емкости (фактически емкость «затвор – сток») в активном режиме входной сигнал подавался на линию, с которой соединен сток транзистора, и ее значение рассчитывалось по проходному сигналу (рис. 8) [4-5] в соответствии с выражением:

$$C_{trans} = \frac{2}{ZE} \int_{T_1}^{T_2} V_{trans} dt, \quad (8)$$

здесь T_1-T_2 – интервал интегрирования, выбранный аналогично интервалу интегрирования для входной емкости.

Измеренные значения входной и проходной емкостей для различных режимов приведены в табл. 1.

Зависимости входной емкости транзистора (без учета емкостей контактной площадки и металлизации) от напряжения на стоке при постоянном напряжении на затворе 1,6 В, и от напряжения на затворе при постоянном напряжении на стоке 1,8 В, приведены на рис. 9а и 9б соответственно.

Из рис. 9а видно, что большие значения входной емкости соответствуют режиму работы транзистора в крутой области ВАХ. Постоянное значение входной емкости 166 фФ для напряжений на затворе в диапазоне напряжений сток-исток 0–0,6 В (рис. 9б) соответствует режиму закрытого транзистора.

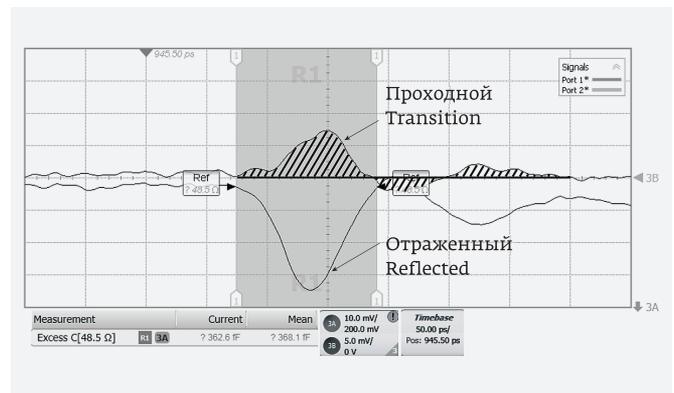


Рис. 8. Осциллограммы отраженного и проходного сигналов при измерении проходной емкости в рабочей точке ($V_g=1,6$ В; $V_d=1,8$ В)

Таблица 1. Измеренные значения параметров транзистора

Режим	Входная емкость, C_{in} , фФ	Проходная емкость, C_{trans} , фФ	Емкость контакт. площ. C_{pg} , фФ	Емкость «затвор – сток», фФ	Емкость «затвор – исток», фФ	Вых. проводимость, g_d , мСм	Крутизна, g_m , мСм
$V_d=0$ В; $V_g=0$ В	288	43	89	43	156	-	-
$V_g=1,6$ В; $V_d=1,8$ В	345	61	89	61	195	1,08	30

Определение выходной проводимости g_{ds} осуществлялось на основе анализа отраженного сигнала в рабочей точке ($V_d=1,8$ В, $V_g=1,6$ В), что соответствует работе транзистора в реальном режиме в усилительных устройствах. Входной сигнал подавался по копланарной линии, с которой соединен сток транзистора. Программное обеспечение рефлектометра позволяет автоматически рассчитывать импеданс. Осциллограмма импедансов показана на рис. 10.

Сопротивление исток-сток транзистора R_{ds} включено параллельно линии передачи, поэтому выражение для расчета выходной проводимости имеет вид:

$$g_{ds} = 1/R_{ds} = \frac{Z - Z_d}{Z_d Z} s, \quad (9)$$

где Z – импеданс копланарной линии, Z_d – импеданс в точке соединения со стоком (измеряемое значение). Подставляя в выражение (9) полученные значения для $Z=48,72$ Ом и $Z_d=46,27$ Ом (рисунок 10), находим значение выходной проводимости 1,08 мСм.

ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЁТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА

Схема включения при измерении динамических характеристик транзистора приведена на рис. 4. Входной сигнал амплитудой 0,2 В подавался по

копланарной линии, к которой подключен затвор транзистора. К затвору и стоку транзистора подключены постоянные напряжения смещения ($V_d=1,8$ В; $V_g=1,6$ В), обеспечивающие работу транзистора в линейном режиме при входном переменном сигнале амплитудой 0,2 В. Контроль отраженного сигнала осуществляется на линии, соединенной с затвором транзистора. Сигнал со стока транзистора поступал на две параллельно включенные копланарные линии с волновым сопротивлением 50 Ом, одна из которых соединена с каналом рефлектометра, другая – с нагрузкой 50 Ом. Таким образом, нагрузкой для транзистора является волновое сопротивление 25 Ом. Осциллограммы сигнала, отраженного от входной емкости и выходного сигнала на стоке, приведены на рис. 7. Из амплитуды выходного сигнала можно определить динамическую крутизну транзистора в заданной рабочей точке. Для рассматриваемого образца транзистора амплитуда выходного сигнала V_{out} составляет 150 мВ. При амплитуде входного сигнала $V_{in}=200$ мВ и сопротивлении нагрузки $R_L=25$ Ом крутизна транзистора g_m , определенная из выражения

$$g_m = \frac{V_{out}}{R_L V_{in}}, \quad (10)$$

составляет 30 мА/В (30 мСм).

Максимальная частота усиления по току F_T рассчитывалась по формуле:

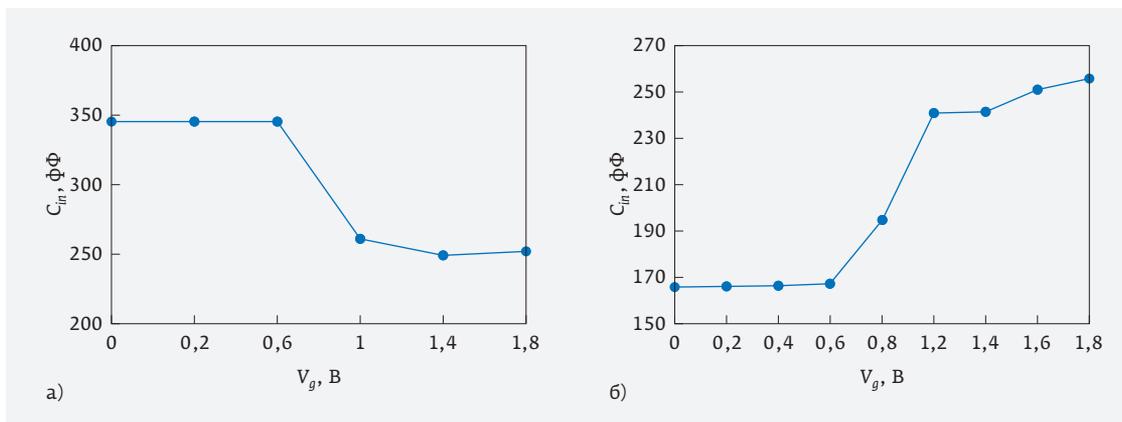


Рис. 9. Зависимости входной емкости: а – от напряжения на стоке при $V_g=1,6$ В, и б – от напряжения на затворе при $V_d=1,8$ В

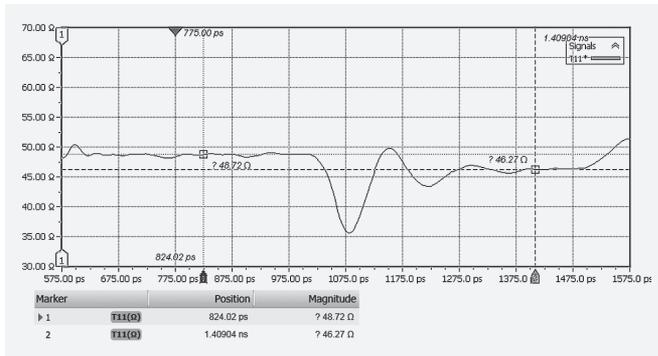


Рис. 10. Осциллограммы импедансов ($V_g=1,6$ В; $V_d=1,8$ В)

$$F_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}. \quad (11)$$

Для исследуемого режима ($V_g=1,6$ В, $V_d=1,8$ В) максимальная частота усиления по току составляет $F_T=18,65$ ГГц.

Задержка распространения сигнала в транзисторе t_D (время включения/выключения), измеренная по уровню 50%-ного входного и выходного сигналов имеет значение 43 пс (рис. 8).

В работе [5] показано, что максимальная частота усиления по току F_T связана с задержкой распространения сигнала в транзисторе выражением

$$F_T = \frac{K}{2t_D}, \quad (12)$$

и экспериментально продемонстрировано, что коэффициент $K \sim \pi/2$. Учитывая выше сказанное и подставляя значение задержки в выражение (12), получаем $F_T=18,27$ ГГц, что хорошо согласуется с результатом, полученным из выражения (11). Таким образом определение максимальной частоты усиления по току можно проводить путем измерения времени задержки.

ВЫВОДЫ

1. Определены параметры транзисторов, изготовленных по технологии КМОП КНИ 180 нм, на основе измерений рефлектометрическим методом в СВЧ-диапазоне. Для исследований использовался кристалл n -МОП-транзистора с общей шириной 108 мкм ($w=1,8$ мкм, $n=60$). Получены следующие результаты:

- удельные значения входной и проходной емкостей, без учета емкости контактных площадок, для холодного ($V_g=0$ В, $V_d=0$ В) и активного ($V_g=1,6$ В, $V_d=1,8$ В) режимов составляют: 2,67 и 0,40 фФ/мкм для холод-

ного режима, 3,19 и 0,56 фФ/мкм для активного режима соответственно;

- удельные значения емкости «затвор – исток» и «затвор – сток» транзистора имеют значения: 1,44 и 0,40 фФ/мкм для холодного режима, 1,81 и 0,56 фФ/мкм для активного режима соответственно;
 - удельные значения динамической крутизны и выходной проводимости транзистора имеют значения 0,278 и 0,01 мСм/мкм соответственно;
 - максимальная частота усиления по току (для рабочей точки $V_g=1,6$ В, $V_d=1,8$ В) составляет $F_T=18,65$ ГГц.
2. Проведено измерение времени задержки распространения сигнала в транзисторе, показано, что максимальная частота усиления по току может определяться из величины времени задержки.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глебович Г.В., Андрианов А.В., Введенский Ю.В. и др. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / Под ред. Г.В.Глебовича. – М.: Радио и связь, 1984. С. 256.
2. Time Domain Reflectometry Theory Application Note <http://materias.fi.uba.ar/6209/download/HP-AN1304.pdf> (дата обращения 28 апреля 2017).
3. Orfanidis S.J. Electromagnetic Waves and Antennas / Rutgers University, 2016.
4. Timoshenkov V., Rodionov D., Khlybov A. TDR method for determination of IC's parameters // Proceedings of the International Conference on Micro and Nano-Electronics 2016 conference. SPIE Digital Library. Proc. of SPIE V. 10224 1022427-1.
5. Тимошенко В.П., Родионов Д.В., Хлыбов А.И. Исследование параметров НЕМТ-транзистора в гигагерцовом диапазоне // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 10. С. 632-640.
6. Тимошенко В.П., Родионов Д.В., Хлыбов А.И., Мусаткин А.С. Методика измерения индуктивности выводов интегральных микросхем на основе анализа сигналов во временной области // Международная научно-практическая конференция «Интеллектуальные системы и микросистемная техника» Россия, Кабардино-Балкария, пос. Эльбрус, 6-12 февраля 2018, Сб. трудов. С. 164-172.

Генерация Rule-based SRAF для двумерных топологических структур с учетом правил MRC: проблемы и решения

► Е. С. Шамин^{1,2}, Е. В. Ипатова², А. В. Кузовков², В. В. Иванов², Н. Н. Балан²

¹МФТИ, ²АО «НИИМЭ»

Как известно, одним из средств RET (Resolution enhancement technology) в фотолитографии является расстановка в топологии непечатаемых вспомогательных структур (SRAF) для уменьшения разницы в пропечатке плотно расположенных и изолированных линий. Для технологии 90 нм наиболее актуальна расстановка SRAF на основе правил (RBSRAF). В статье описываются проблемы, связанные с расстановкой RBSRAF для двумерных топологий с манхэттенской геометрией, и приводится пример их решения, учитывающий ограничения, накладываемые правилами проектирования фотошаблонов.

Rule-Based SRAF Generation for Two-dimensional Topological Structures with MRC Rules Being Considered: Problems and Solution

E. S. Shamin^{1, 2}, E. V. Ipatova², A. V. Kuzovkov², V. V. Ivanov², N. N. Balan²

¹MIPT; ²MERISC

As known, one of the RET (Resolution enhancement technology) tools in photolithography is a placement of Sub-resolution assist features (SRAF). This method helps to reduce the difference in printing of dense and isolated lines. In case of 90 nm technology, Rule-based SRAF placement (RBSRAF) is considered as best solution. This article describes problems, associated with RBSRAF placement for two-dimensional topologies with Manhattan geometry, and provides an example of their solution, which takes the limitations, imposed by the photomask design rules, into account.

ВВЕДЕНИЕ

С уменьшением характерных размеров элементов микроэлектроники задача изготовления интегральных схем становится все более затруднительной [1]. Использование процесса фотолитографии – одного из основных процессов в производстве интегральных схем [2] – приобретает все больше особенностей, требующих большего внимания.

Одной из основных характеристик процесса фотолитографии является его разрешающая способность. Ввиду множества физических ограничений процесса фотолитографии, таких как оптическая близость и дифракционные эффекты, для воспроизведения в фоторезисте структур с размерами, меньшими длины волны источника излучения, требуется применение методов повышения разрешающей способности (RET – resolution enhancement technology) [2]. На сегодняшний день методы RET

являются неотъемлемой частью технологического процесса при производстве СБИС с критическими размерами от 180 нм и ниже [2]. Один из принципов их работы состоит во внесении изменений в топологию фотошаблонов для компенсации физических ограничений процесса фотолитографии [3].

Одним из методов RET является расстановка в топологии непечатаемых вспомогательных структур (SRAF – Sub-resolution Assist Features) [4]. По своему определению, SRAF должны иметь размеры ниже разрешающей способности фотолитографии и, соответственно, не должны появляться в резисте. Однако их наличие должно влиять на формирование основных структур. Одним из основных применений SRAF является устранение разницы в формировании плотно расположенных и изолированных линий, близких к пределу разрешения [5]. Данная проблема заключается в том, что для указанных пат-

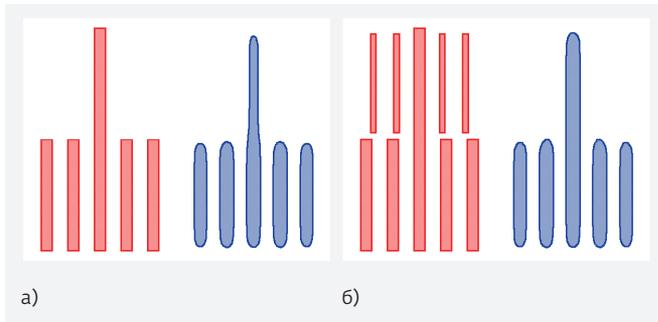


Рис. 1. Моделирование плотно расположенных или изолированных линий ($CD=100$ нм): а – без использования SRAF; б – с использованием SRAF

тернов (рис. 1) оптимальные значения дозы и фокуса значительно отличаются. Таким образом, их изготовление за один процесс фотолитографии невозможно без использования SRAF. При этом проблема еще более актуализируется с уменьшением норм технологии. Применение SRAF позволяет приблизить оптимальные параметры процесса фотолитографии для плотно расположенных и изолированных структур. Иначе говоря, SRAF используются для того, чтобы поведение изолированных линий мало отличалось от поведения плотно расположенных линий в фотолитографическом плане [5].

Можно выделить два основных подхода к расстановке SRAF – Rule-based SRAF (RBSRAF) и Model-based SRAF (MBSRAF). При выборе наилучшего для определенной технологии подхода к расстановке SRAF необходимо правильно оценить оптимальное соотношение сложности применяемого метода к требуемому уровню качества его работы. Model-based-подход к расстановке SRAF обладает высокой вычислительной сложностью, однако позволяет получить SRAF наилучшего качества. Это важно для технологий с низкими проектными нормами ввиду того, что даже малая ошибка в расстановке SRAF на критическом слое может привести к браку [6]. Rule-based-подход к расстановке SRAF, в отличие Model-based-подхода, обладает более низкой вычислительной сложностью. Его использование также может давать приемлемые результаты, однако в этом случае имеется необходимость предварительного определения оптимального набора правил расстановки SRAF [3, 7].

Несмотря на то, что MBSRAF дают результат лучше, чем RBSRAF, для технологии 90 нм достаточным является использование второго подхода [8]. Именно RBSRAF будут в центре внимания данной работы. Проблематика их использования будет описана в рамках топологий с манхэттенской геометрией.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ПРИНЦИПОВ РАССТАНОВКИ SRAF

Обычно под правилами расстановки SRAF понимается некоторый набор значений и диапазонов, однозначно соответствующий всем характерным размерам, которые можно встретить в топологии с расставленными SRAF. В случае обработки одномерной топологии (любую структуру в которой можно описать одним размером) характерными размерами будут:

- ширины структур, для которых должны ставиться SRAF;
- размеры промежутков между структурами, в которые должны ставиться SRAF;
- ширины SRAF, которые будут поставлены.

Реальные топологии, однако, не являются одномерными. Перечень характерных размеров для реальных топологий является на много более обширным. Причем то, какие именно характерные размеры будут иметь место в обработанной топологии – зависит от конкретного алгоритма расстановки SRAF. В отличие от MBSRAF, принцип расстановки которых не имеет особенностей, связанных с двумерностью обрабатываемой топологии [3], расстановка RBSRAF в случае двумерных топологий сопряжена с рядом проблем [5], среди которых можно выделить три основные.

Первая проблема, возникающая при переходе к двумерным топологиям – угловые паттерны SRAF (рис. 2а). Как уже было упомянуто, SRAF должны иметь достаточно малую ширину, чтобы не появляться в резисте. С другой стороны, чем больше ширина SRAF, тем больше изолированные линии становятся похожи на плотно расположенные [9]. Эти два факта приводят к необходимости использовать SRAF максимально допустимой ширины. Однако уже на нормах 130 нм SRAF допустимого размера формировались в резисте в местах Т-образных пересечений, повышая вероятность брака [6]. Исходя из этого, для технологии 130 нм в International Business Machines (IBM) был введен запрет на Т-образные паттерны SRAF. Для случая технологии 90 нм ситуация еще более усугубилась. На рис. 2а можно видеть результаты моделирования фоторезистивной маски для слоя поликремниевых затворов технологии 90 нм (ширина центральной структуры 100 нм). Результаты были получены с помощью САПР Mentor Graphics Calibre на основе эмпирических моделей. По рис. 2а видно, что для технологии 90 нм Г-образные, или угловые, паттерны SRAF так же должны быть запрещены.

Очевидным решением по запрещению Г-образных паттернов SRAF является их полное удаление. Однако

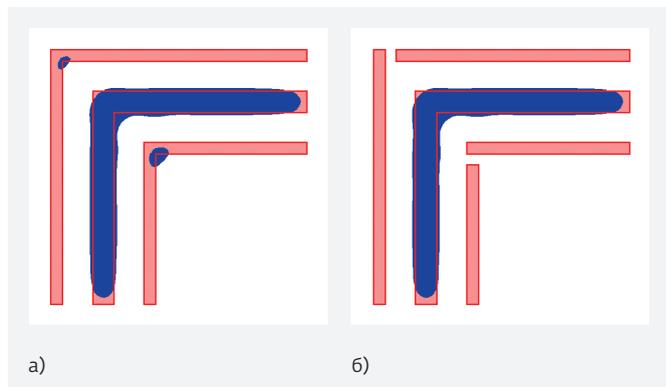


Рис. 2. Проблема проявления угловых SRAF: а – моделирование угловых SRAF; б – моделирование приоритизированных SRAF

даже присутствие в топологии малых элементов, требующих SRAF, но не имеющих их, может привести к серьезным ошибкам [6]. Более правильным решением по запрещению угловых SRAF является их приоритизация – определение того, какие SRAF являются более важными и удаление частей менее важных SRAF. Приоритизация может проводиться разными методами, например, с помощью разбиения Вороного [10], с помощью указания приоритетного слоя, покрывающего более важные структуры [3], с помощью определения степени важности обрабатываемых элементов топологии [6, 11]. Также, если все структуры на обрабатываемом слое имеют одинаковый приоритет – с помощью классификации по ориентации и размеру элементов топологии [11]. Использование приоритизации обеспечивает более плотную расстановку SRAF, при этом исключая риск их нежелательного формирования (рис. 2б). Таким образом, в топологии со SRAF появится еще несколько харак-

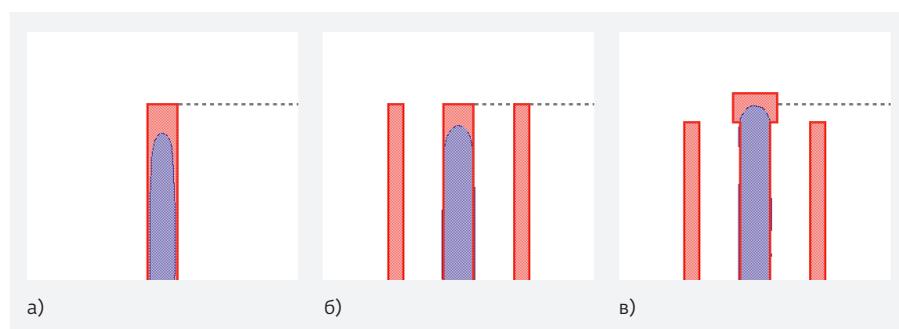


Рис. 3. Моделирование конца линий: а – без коррекции; б – со SRAF; в – с использованием сдвиговой OPC и SRAF. Серый пунктир указывает положение конца линии без коррекции

терных размеров, описывающих правила приоритизации.

Еще одна проблема к решению состоит в том, чтобы иметь возможность учесть будущие шаги по обработке топологии, а именно OPC коррекцию. Как известно, производство таких паттернов, как концы линий, связано с двумя сложностями: скругление углов и укорачивание линий [2, 12]. Минимизировать эти эффекты позволяет сдвиговая OPC коррекция, подразумевающая изменение формы и увеличение части линии, близкой к ее концу (рис. 3). Однако для такой коррекции помехой могут стать SRAF, полученные с помощью проведенной ранее расстановки. Для учета этой проблемы достаточно ввести новый характерный размер для топологии со SRAF: расстояние от конца линий до начала SRAF. Это позволит производить концы линий наилучшим образом (рис. 3в).

Не менее важной проблемой является разрешение вопроса об обработке сколов между касающимися SRAF (рис. 4а). Данная проблема уже рассматривалась в [6] в рамках технологии 130 нм. Решением проблемы в [6] было создание из скола полноценного зигзага (рис. 4б). Однако на рассматриваемом в статье [6] уровне технологии не были запрещены угловые паттерны SRAF. Для нашего же случая единственным решением остается симметричная обрезка SRAF на сколе, что добавляет еще один характерный размер (рис. 4в).

ОГРАНИЧЕНИЯ, НАКЛАДЫВАЕМЫЕ ПРАВИЛАМИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОТОШАБЛОНОВ

Вышеописанных принципов в целом достаточно для полноценной расстановки SRAF. Однако для соблюдения правил MRC (Mask Rule Check) и обеспечения высокого выхода годных в первоначальные принципы необходимо внести несколько дополнений.

Одна из наиболее распространенных MRC проверок – проверка на близость углов элементов топологии друг к другу. Расстановка SRAF с использованием только вышеописанных принципов может привести к ситуациям, когда углы SRAF находятся в непосредственной близости к другим SRAF или к элементам топологии. Коррекция в таких паттернах может проводиться посредством симметричной обрезки

в первом случае и посредством обрезки SRAF с конфликтной стороны во втором (рис. 5а).

Следующая MRC-проверка – проверка на близость сторон элементов топологии друг к другу. Аналогично с предыдущим случаем, здесь могут иметь место как паттерны с ошибками между двумя разными SRAF, так и паттерны с ошибками между элементами топологии и SRAF. Коррекция в обоих паттернах должна проводиться посредством обрезки того SRAF, конец которого вызывает ошибку (рис. 5б).

Последняя к рассмотрению MRC-проверка – проверка на минимальный размер и площадь элементов топологии. При расстановке SRAF с учетом всех предыдущих ограничений и очисток могут возникнуть ситуации, когда некоторые из оставшихся SRAF имеют слишком малые линейные размеры или площадь. В таких случаях решением может стать как удаление, так и попытка достроить слишком короткие SRAF до их объединения со SRAF нормального размера. Подобная операция, однако, должна иметь ряд ограничений, таких как максимальное расстояние, на котором можно искать SRAF, подходящий для объединения. Также необходимо проверять достроенную часть SRAF на конфликтность с уже существующими структурами. Хотя эта операция может показаться избыточной, ее наличие позволяет обеспечить наиболее плотную расстановку SRAF (рис. 5в). Таким образом, в топологии со SRAF должны появиться еще три характерных размера.

ВАРИАНТ РЕАЛИЗАЦИИ РАССТАНОВКИ SRAF С УЧЕТОМ ВСЕХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Все вышеописанные принципы расстановки SRAF были реализованы в виде автоматизированного программного средства [13, 14]. Его работа основана на использовании таких простых команд, как:

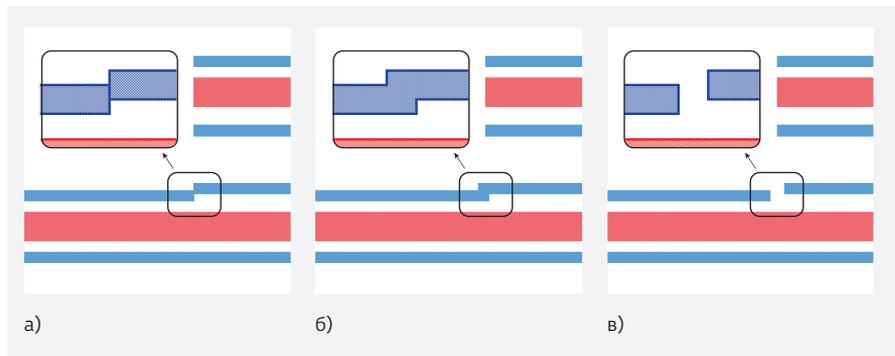


Рис. 4. Решения проблемы скола между касающимися SRAF: а – скол без коррекции; б – создание зигзага; в – симметричная очистка

- поиск сторон элементов топологии с определенным внутренним / внешним расстоянием между ними;
- поиск сторон элементов топологии с определенной длиной;
- поиск сторон элементов топологии, имеющих определенную ориентацию;
- поиск сторон элементов топологии, лежащих между определенным числом выпуклых углов;

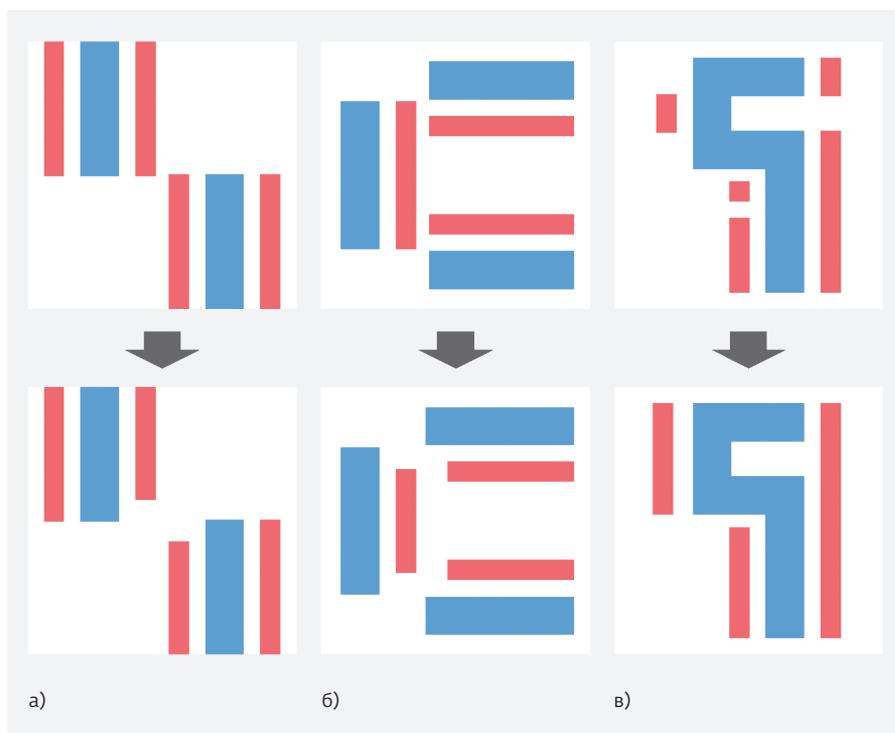


Рис. 5. Примеры паттернов, вызывающих ошибки и их коррекция: а – паттерн со слишком близкими углами SRAF; б – паттерн со слишком близкими сторонами SRAF; в – паттерн со слишком малыми SRAF

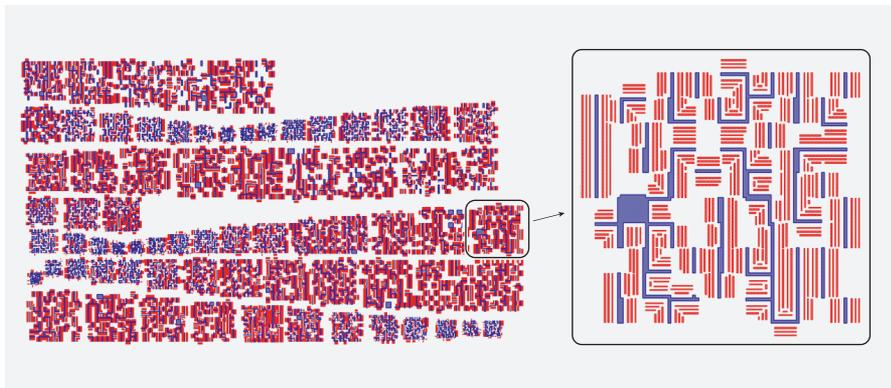


Рис. 6. 137 случайных топологий с расставленными SRAF

- команда создания новых полигонов на основе найденных сторон;
- булевы операции между элементами топологии.

Ввиду того, что все эти команды доступны в рамках языка SVRF, являющегося частью САПР Mentor Graphics Calibre, было решено использовать его в качестве основы, расширив недостающий функционал кодом на Python.

Программа может работать в двух режимах. Первый позволяет указывать все описанные в этой статье характерные размеры, а также настраивать параметры SRAF для каждого расстояния между элементами топологии отдельно. Второй позволяет провести расстановку SRAF по упрощенному набору из 10-ти характерных размеров:

- SbWidth – ширина всех расставляемых SRAF;
- SbDist – расстояние от любой стороны топологии до SRAF;
- MinGap – расстояние между любыми SRAF;
- MaxSize – максимальная ширина элемента топологии, для которого ставятся SRAF;
- SbFeature – расстояние между элементом топологии и концом SRAF;
- SbSb – расстояние между SRAF и концом любого другого SRAF;
- Eps – размер укорачивания SRAF у концов линий;
- MinLength – длина стороны минимального элемента топологии, для которого ставятся SRAF;
- MinSRAFLength – минимальная длина SRAF;
- MinArea – минимальная площадь SRAF.

Также стоит отметить возможность выбирать любое значение параметра MaxSRAFNumber, отвечающего за максимальное количество SRAF, расставляемых в промежутке между элементами топологии. Это позволит проводить эксперименты по поиску

наилучшего количества SRAF для каждого слоя технологии.

Все остальные параметры SRAF рассчитываются на основе указанных 11-ти значений, что открывает большие возможности по нахождению оптимального рецепта расстановки SRAF.

Работа инструмента была проверена на 137 топологиях сгенерированных случайным образом с разными характерными размерами структур и промежутков между ними [15]. Все они были обработаны без оши-

бок (рис. 6).

ВЫВОДЫ

Учет описанных в работе ограничений и принципов является достаточным для разработки полноценного инструмента расстановки Rule-based SRAF. Разработанное в качестве примера в данной работе программное средство не только учитывает все проблемы, связанные со сложностью перехода правил SRAF от одномерных топологий к реальным, но и является неконфликтным с точки зрения MRC проверок. Его работа является быстрой, стабильной, а результаты не уступают в качестве лицензированным инструментам.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красников Г. Я., Горнев Е. С.** Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и МИКРОН». История отечественной электроники. В 2-х т. – М., 2012.
2. **Беспалов В. А. и др.** Введение в дизайн фотошаблонов для изготовления микро- и наносистем. Cadence MaskCompose / Под ред. Беспалова В. А. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 199 с.
3. **Sheffer L., Lavagno L., Grant M.** Electronic Design Automation for Integrated Circuits Handbook. CRC Press, 2006. 616 p. ISBN0-8493-7924-5.
4. **Balaszinski A.** Design for Manufacturability. From 1D to 4D for 90–22 nm Technology Nodes. Springer, 2014. 283 p. ISBN978-1-4614-1760-6.
5. **Mack C.** Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication.

- Wiley-Interscience, 2008. 534 p.
ISBN9780470018934.
6. **Lars W. Liebmann et al.** Optimizing style options for subresolution assist features. Proc. SPIE4346, Optical Microlithography XIV, (14 September 2001), doi:10.1117/12.435690.
 7. **Xiaoqing Xu et al.** Sub-resolution Assist Feature Generation with Supervised Data Learning. IEEE37(6), (31 August 2017), doi:10.1109/TCAD.2017.2748029.
 8. **Allen H. Gabor et al.** Sub-resolution assist feature implementation for high-performance logic gate-level lithography. Proc. SPIE4691, Optical Microlithography XV, (30 July 2002), doi:10.1117/12.474591.
 9. **Pforr R. et al.** Feature biasing versus feature-assisted lithography: a comparison of proximity correction methods for $0.5^*(\lambda/NA)$ lithography. Proc. SPIE2440, (May 1995), doi: 10.1117/12.209249.
 10. **Maharaj Mukherjee et al.** The problem of optimal placement of sub-resolution assist features (SRAF). Proc. SPIE5754, Optical Microlithography XVIII, (12 May 2005), doi:10.1117/12.599884.
 11. **Liebmann L. and Mansfield S.** Method of incorporating sub resolution assist features in a photomask layout. US Patent 6413683, 2002.
 12. **Кузовков А. В., Иванов В. В.** Использование непечатаемых вспомогательных структур для повышения разрешающей способности фотолитографии [Электронный ресурс] // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 5-8 апреля, 2016, Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М.: ООО «Квантор-Форм», 2016. № гос. регистрации 0321601363. URL: studvesna.ru?go=articles&id=1764 (дата обращения: 01.07.2019). Загл. с экрана.
 13. **Горнев Е. С., Шамин Е. С.** Разработка средства расстановки вспомогательных непечатаемых структур для технологии 90 нм // Труды научного совета РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы информационно-вычислительных и управляющих систем и материалов для ее создания». 2019. Т. 3 (2) / Г. Я. Красников и др. – М.: ООО «Сам Полиграфист», 2019. 146 с.: ил.
 14. **Шамин Е. С., Харченко Е. Л., Кузовков А. В., Иванов В. В.** Инструмент определения и реализации правил размещения SRAF для технологии 90 нм // 26-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Микроэлектроника и информатика-2019». МИЭТ, 2019.
 15. **Ипатов Е. В.** Разработка метода генерации топологии случайной конфигурации для обработки ОРС-решений // 25-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Микроэлектроника и информатика-2018». МИЭТ, 2018.

Промышленная технология микроэлектроники

► Е. С. Горнев
АО «НИИМЭ»

Микроэлектроника относится к числу приоритетных отраслей промышленности и является важнейшим направлением научно-технического прогресса во всех развитых странах. Все экономически развитые страны уверенно встали на путь тотальной компьютеризации и информатизации своих обществ. Способность разрабатывать и производить высокотехнологичные изделия микроэлектроники уже сегодня в значительной мере определяет уровень общественного развития этих стран в целом, и в будущем эта тенденция будет только усиливаться.

Выработка общих принципов организации технологического процесса и разработка оптимальной, технологически реализуемой и относительно дешевой СБИС с субмикронными размерами невозможны без единого комплексного подхода, включающего в себя рассмотрение всей совокупности проблем. При этом необходимо обеспечить достижение отдельных целей одновременно с максимальным участием в выполнении всех связанных с этим отдельных задач и достижением тем самым главной цели, поставленной перед системой. Для этого необходимы большая подготовительная работа, глубокие знания и понимание составляющих компонентов проблемы, взаимосвязей между этими компонентами, стоимостных отношений, всей проблемы в целом.

The Industrial Technology of Microelectronics

E. S. Gornev

MERI SC

Microelectronics is the most important direction of scientific and technical progress among priority industries in all developed countries. All economically developed countries surely followed a way of a total computerization and informatization of their societies. The ability to develop and make hi-tech products of microelectronics already today considerably determines the level of social development of these countries in general, and in the future this tendency will only be amplified.

Development of general principles of technological process of organization and development of optimum, technologically realized and rather cheap system-on-chip with submicron sizes are impossible without the uniform integrated approach including consideration all set of problems. At the same time it is necessary to provide the achievement of separate purposes along with the maximum participation in performance of all separate tasks connected with it and the achievement thus the main goal of a system. For this goal it is required a lot of preparatory work, profound knowledge and understanding all component parts of a problem, interrelations between these components and the value relations the whole problem in general.

«Индустрия интегральных схем является ядром индустрии информационных технологий..., которая поддерживает экономическое и социальное развитие и защищает национальную безопасность».

Бай Чунли, президент Китайской академии наук

Сегодня специалисты в области микроэлектроники сталкиваются с такими вызовами, о которых предыдущие поколения и не догадывались. Однако общая суть этой категории не изменилась.

Похоже, технология микроэлектроники вступила в такой цикл своего развития, когда вероятность сегодняшнего невероятного возрастает. Воображение не поспевает за головокружительным бегом

времени и лавинообразным нарастанием проблем.

Проекция нашего настоящего, пусть и высокоразвитого (правда, по сравнению, например, с 60-ми годами двадцатого века), в будущее, на те же пятьдесят лет, будет иметь мало реального с этим действительным будущим. В лучшем случае, мы можем представить только направления развития, но никак не результаты этого развития. Поэтому, сегодняшние прогнозы на пятидесятые годы нашего столетия, предстают, скорее всего, так, как их представляют популяризаторы науки и отдельных ее отраслей.

Выработка основных принципов организации технологического процесса и разработка оптимальной, технологически реализуемой и относительно дешевой СБИС с субмикронными размерами невозможны без единого комплексного подхода, включающего в себя рассмотрение всей совокупности проблем. Деятельность заключается в достижении отдельных целей одновременно с максимальным участием в выполнении всех связанных с этим отдельных задач и достижением тем самым главной цели, поставленной перед системой. Для этого необходимы большая подготовительная работа, глубокие знания и понимание составляющих компонентов системы, взаимосвязей между этими компонентами, стоимостных отношений как имеющихся, так и доступных к получению устройств и оборудования, испытанных и возможных методов и способов, и, наконец, всей системы в целом.

Как говорится [1]: «Любая производственная технология, современная или архаичская, решает три основополагающие технологические проблемы, которые можно сформулировать в виде вопросов: Как обрабатывать? На чем обрабатывать? Чем обрабатывать? Все производственные технологии базируются на процессах обработки, видоизменения материалов. Например, технологии получения металлов основаны на процессах изменения химического состава и физических свойств руды; технологии механической обработки – на процессах изменения формы обрабатываемых деталей; химические технологии – на химических реакциях». Несмотря на несовершенство этих определений, можно сделать вывод, технология формируется из отдельных фрагментарных звеньев производственной деятельности.

Технология должна отвечать некоторым обязательным требованиям, чтобы считаться промышленной. Предметом промышленной технологии должны быть процессы, связанные с производством **во всех его проявлениях**. И, чем выше уровень технологии, а микроэлектроника наиболее характерный ее образец, тем больше все производственные процессы должны пред-

ставлять систему хорошо скоординированных друг с другом последовательных и параллельных процессов, отличающихся высокой степенью совершенства. Необходимо описать эти процессы, охарактеризовать отдельные его операции, оценить значение различных входных факторов и инструментов их реализации, в осуществлении каждой из операций и процесса в целом. Когда говорится о промышленной технологии, то должно говориться о процессах, связанных с производством во всех его проявлениях. В то же время промышленная технология должна иметь, и имеет определенные критерии. К ним относятся обеспечение затрат меньше доходов, стабильный техпроцесс, необходимые ресурсы, непрерывность процессов, короткое время для принятия решения, на все вопросы есть готовые ответы, процесс полностью нормализован и наличие, по крайней мере, одной цели (т.е. желаемого конечного состояния или результата).

Если говорить о микроэлектронике, то к обязательным требованиям промышленной технологии нужно отнести следующие:

1. Адаптивность – свойство удовлетворять будущие, постоянно изменяющиеся и специфические настоящие требования потребителя.
2. Обеспечение непрерывности производства.
3. Определенность, воспроизводимость и стабильность технологического процесса.
4. Прецизионность и точность технологических операций соответствует технологическому уровню.
5. Создание соответствующих чистых условий производства, снижение дефектности производства, в том числе привносимой.
6. Высокий выход годных, соответствующий производственным условиям.
7. Эффективная система управления производством.
8. Использование статистических методов управления.
9. Управление качеством базируется на управлении всеми процессами планирования, проектирования, разработки, производства и сбыта продукции.
10. Комплексно регулируются затраты, цены и доходы, контролируется объем производства, «незавершенного» производства, продаж и сроки поставки.
11. Стремление к совершенствованию. Технологический процесс обеспечивает непрерывное развитие рынка.
12. Интегрирование технических решений.

13. Высокий уровень подготовки персонала.
14. Комплексная технологическая документация включает в себя описание техпроцесса и всех процедур, связанных с производством микросхем и его организацией.

Таким образом, определяется актуальность формулирования определения «промышленная технология микроэлектроники». Как говорил незабвенный капитан Христофор Бонифатьевич Врунгель, «как вы судно назовете, так оно и поплывет».

Особенности наших книг в том, что они зачастую написаны людьми, не знающими производство изнутри, то есть теоретиками. Зачастую, особенно в последнее время, путается вид (тип) производства с характером. Вид производства определяется, в первую очередь, количеством выпускаемой продукции за единицу времени, то есть производительностью, исчисляемой в натуральном выражении. При этом при любом виде производства продукция может быть стандартизована. Так, в целом неплохой и полезной книге [2] нечетко и даже неверно определены типы производств. Например, «единичное производство предполагает разработку крупного (подчеркнуто мной – Е.Г.) индивидуального проекта и производство по ним небольших партий продукции» (с.14). А массовое производство определено, как «производство больших объемов стандартизованных (подчеркнуто мной – Е.Г.) изделий и услуг» (с.15). При этом стандартизованная продукция определена как «продукция с высокой степенью однородности» (с.13). Необходимо отметить, что в единичном производстве могут изготавливаться экспериментальные образцы, уникальный, но относительно простой инструмент и т. д.

Вводится понятие партионного производства – «изготовление партий или единичных товаров и услуг с разнообразными спецификациями в соответствии с заказами потребителя». Партия и единичные товары – совершенно разные понятия. Так, например, в микроэлектронике основу производства, и единичного, и массового, составляет партия пластин.

Стандартизованная продукция – это продукция, параметры которой отвечают требованиям тех или иных стандартов. Специальная продукция также может быть стандартизованной.

Серийное производство характеризуется одновременным изготовлением (на предприятии) сравнительно широкой номенклатуры однородной продукции, выпуск которой повторяется в течение продолжительного времени [3]. Массовое производство характеризуется непрерывностью изготовления в течение длительного периода одинаковой продук-

ции при строгой повторяемости производственного процесса. Единичное производство характеризуется единичным (штучным) изготовлением продукции разнообразной и непостоянной номенклатуры. Производство, ориентированное на определенного потребителя, требует значительных первоначальных затрат, дополнительного финансирования (в т. ч. кредиты). Продукция подвергается постоянному обновлению, требуются высококвалифицированные специалисты в узких областях. Высокая рентабельность возможна при фактическом отсутствии конкурентов. Рентабельность низкая, так как уровень себестоимости очень высокий.

Производство, ориентированное на субконтракты. Требуется соблюдение сроков поставки продукции (при ориентации на крупного потребителя) В связи с чем требуется эффективная система управления качеством. Конкурентоспособность может быть высокой при низкой рентабельности. Часто используется ограниченное число базовых процессов.

Производство, ориентированное на уникальность заказов. Требуется высококвалифицированная команда и жесткая схема управления и т. д.

Процесс – набор взаимосвязанных ресурсов и работ, благодаря которым входные воздействия преобразуются в выходные результаты [4]. Посредством работ перерабатываются ресурсы для достижения целей и/или получения продукта процесса.

Технологический процесс – часть производственного процесса, содержащая действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства. Технологический процесс представляет собой совокупность механических, физических, химических процессов – операций, изменяющих форму и размеры деталей, их свойства и внешний вид.

Технологический процесс делится на операции – законченная часть технологического процесса, на одном рабочем месте до перехода к обработке следующей партии, пластины, заготовки, сборки и т. д. Операции состоят из переходов – части операции, характеризующейся неизменностью технологического режима – рабочего инструмента, оснастки, параметров оборудования и т. д.

Определение промышленной технологии микроэлектроники должно дать ответы на следующие вопросы:

1. Что является предметом промышленной технологии микроэлектроники?
2. Каково назначение промышленной технологии микроэлектроники: научное или прикладное?

3. Какие цели преследует промышленная технология микроэлектроники?

Понятие «технология» приобрело гораздо более многоплановое измерение по сравнению, скажем, с «Технология – от греческого τέχνη – искусство, мастерство, умение; и логия – совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, применяемых в процессе производства для получения готовой продукции; наука о способах воздействия на сырье, материалы и полуфабрикаты соответствующими орудиями производства [5].

Технология микроэлектроники в своем развитии в течение относительно немногих лет прошла путь от систематизации обработки кремниевых пластин и сборки интегральных микросхем до научно обоснованных положений, разработанных на базе теоретических исследований, экспериментов и обобщения опыта. С появлением более сложных сверх больших интегральных схем (СБИС) и высокоспециализированных технологий их создания потребовались иные принципы, подходы, формы познания и управления процессом, основанные на глубине понимания и знания проблемы и методов ее решения и на расширении и использовании научно-технического задела. Это способствует разработке новых видов продукции и реальному техническому развитию. Для создания продукции высочайшего качества, которой являются сверхбольшие интегральные схемы, необходимо использовать все имеющиеся в распоряжении средства и методы. Развитие интеграции, требования по снижению привносимой дефектности, рост и усложнение информационных потоков между разрозненными объектами производства, формирование новых гибких производственных систем, усиление конкуренции потребовали комплексный подход к проблеме процесса создания интегральных схем и формирования теоретического направления его изучения. Ранее, вплоть до 90-х годов прошлого века, в отечественной науке такой подход не встречался.

Развитие технологии и ее направленность обуславливается совершенствованием технологических процессов, новыми методами управления производства, дальнейшего развития САПР, САПР ТП и автоматизации производства при постоянном обеспечении высокого качества и снижении себестоимости. В течение последних сорока лет рост производства сверхбольших интегральных схем происходил экспоненциально. Этот рост достигается за счет согласованного улучшения технологии изготовления, качества материалов, процесса проектирования и контроля. Процессы стали достаточно сложными, а размер пластин

увеличился. Высокая сложность задачи создания субмикронного производства требует соответствующего понимания связей между техникой, технологией, экономикой, потребностями рынка и закономерностей развития микроэлектроники для формирования концепции ее технологического развития и создания адекватной модели.

Промышленная технология является набором взаимно связанных, в течение определенного времени, процессов для достижения поставленной цели. А управление проектом является руководством этими процессами для своевременного достижения цели в рамках бюджета. Комплексная деятельность, особенно с переплетением операций и сроков работ требуют плана, четко определяющего, что должно быть сделано, кем, когда и за какие деньги.

Современная компания по созданию сверхбольших интегральных схем концентрирует в себе достижения в передовой технологии и теории управления. Она должно действовать достаточно гибко и быстро модернизироваться с тем, чтобы иметь возможность работать с несколькими поколениями технологий. Для обеспечения эффективного руководства производственными предприятиями, такие вопросы как исследование технологических операций, эффективность оборудования, продолжительность процессов при обработке пластин, управление запасами и анализ полной стоимости собственности – являются сейчас такими же важными, как чистота химикатов и качество кремниевых пластин, которые используются на предприятии. Таким образом, имеем процессы управления технологией и процессы, связанные с продуктом технологии. Опасны не системность и неполнота знаний и понимания предмета. Отсюда частое попадание в тупиковые ситуации, из которых, казалось бы, нет выхода.

В то же время в независимости от организации производства, проблемы надежности продукции и ее низкой себестоимости невозможно решать при используемых низкого качества материалах и дефектной разработке.

Создание, прежде всего, промышленных технологий, идет с целью получения наибольшего эффекта при наименьших затратах и на саму технологию, и на управление этими процессами. Промышленная технология является результатом взаимного действия различных сил, часто разнонаправленных. Промышленная технология – это группа (технологических) процессов (набор), сознательно координируемых для достижения общей цели. Для получения нужного результата требуется учитывать все – от и до. Сложность технологии растет. Растет сложность

методов анализа, исследований, описания (моделей). Взаимодействие осложняется открытостью систем, нелинейностью, неравновесностью. Рост сложности является результатом развития. Сложность связана с наращиванием числа элементов, подсистем, технологических операций и, соответственно, вариантов решений. Это ведет к снижению надежности технологической системы, снижению эффективности ее функционирования.

Понятие сложности зависит от наших знаний, от нашего понимания системы, то есть носит субъективный характер. Но есть и объективный, вытекающий из суммы субъективных. Аддитивная сложность – сложность, образованная суммой свойств элементов. Неаддитивная сложность – целостные свойства системы, учитывающие качественную определенность системы, разнообразие элементов. В этом случае система имеет организованную сложность – целостность, обладающую свойствами, которые отсутствуют у составляющих ее элементов. Например, сложность ДОЗУ и СОЗУ, цифровых и аналоговых ИС, ЦАП и АЦП, КМОП и биполярных микросхем. Наконец, микропроцессоров и систем на кристалле. В первом случае сложность можно оценить количественно, во втором количество элементов не объясняет природу и специфику сложности.

Можно подумать, что сложность – это результат только взаимодействия объекта и наблюдателя. Но сложность имеет и объективную суть. Например, при оценке системы. Что является критерием сложности? Количество операций? Но они могут быть простыми. Трудоемкость? Материалоемкость? Количество функций? Эти критерии могут быть взаимоисключающими. Опять же, в зависимости от понимания и знания критерии могут быть разными. Например, иностранный язык для начинающего и для лингвиста.

Упростить систему и повысить ее надежность можно, если сделать ее более однородной [6]. То есть одним из правил ограничения сложности системы является применение однородных элементов и унифицированных решений. Тем самым создается однородная система; унификация и стандартизация приводит к сокращению числа элементов и связей между ними. В результате повышается функциональная надежность. В пределах однородных систем вполне приемлема их количественная оценка. При таком подходе можно повысить (увеличить) функциональные возможности системы – увеличить количество ее логических возможностей и, соответственно, способов поведения.

Исходя из критерия сложности и вырабатывается метод анализа. Можно пойти по пути познания

промышленной технологии через ее разложение на составляющие части и попытаться понять, как эти части соединены в этой самой технологии, как они влияют на нее и через изменение какой-либо или каких-либо из частей попытаться улучшить целое. Но при этом требуется учитывать все. Можно задействовать эти составные части для дальнейшего совершенствования или нет, но нельзя их не учитывать, не обращать на них внимание.

Системы требуют ограничения разнообразия, так как в противном случае растет количество функциональных элементов, что ведет к неуправляемому увеличению сложности и снижению ее надежности.

Поэтому, нужно определить область функций, которые должна реализовать система. А из них выделить существенные, то есть необходимые в любой момент действия системы. Определение соотношений (связей) между входными и выходными данными дают возможность при определенных условиях синтезировать (моделировать) поведение системы, комбинируя элементарными функциями. Модель – информационное представление системы. Моделирование необходимо в случае невозможности или сложности получения данных в прямом эксперименте.

Таким образом, сложные системы можно и нужно реализовывать посредством простых элементов. При этом, функции простой (элементарной) системы будут являться элементами сложной.

Системно подходя к проблеме организации технологического процесса, мы охватываем все проблемы, решение которых необходимо для этого, и приходим к выводу о взаимосвязанности всех этих вопросов при производстве микросхем, особенно большой степени интеграции.

Как уменьшить сложность систем?

1. Выявить применимость ограничительных признаков системы [7]. Понятие «система» упрощает объект, организуя его элементы и подсистемы в упорядоченное и организованное целое. Система упорядочивает выделенные части и элементы в целостность.
2. Нужно определить законы (правила) поведения систем и их использование – любая сложная система подчиняется определенным законам, нужно их только определить.
3. Представить систему в виде модели. Модель – это информационное представление системы. Моделирование необходимо в случае невозможности или сложности получения данных в прямом эксперименте.
4. Построить модель, применяя исследование операций – анализ отдельных элементов

системы. Это особенно важно для анализа систем управления.

5. Расчленив систему на условно самостоятельные подсистемы, то есть провести декомпозицию. При этом необходимо обеспечить выполнение глобальных критериев всей системы. Так как локальные критерии зачастую могут не совпадать и даже противоречить глобальному. Главное – определение способа представления сложной системы в виде комбинации составляющих ее подсистем.
6. Определим область функций, реализуемых данной системой.

Выделим существенные функции. Попробуем определить соотношение между входом и выходом в том или ином случае. Представим сложную систему в виде комбинации более простых. Можно получить диаграмму Исикавы [8].

Процесс не существует сам по себе. Процесс начинается, когда определена цель, сформулированы конкретные требования, указаны временные ограничения, определены затраты и соответствующие ресурсы. Ресурсы включают управленческий персонал, услуги исполнителей, финансы, производственные мощности, оборудование, инструкции и методики.

Производственные процессы включают в себя и процессы управления производством. Перерабатывающие подсистемы превращают ресурсы в продукцию. Обеспечивающие подсистемы обеспечивают перерабатывающие. Выбор в пользу перерабатывающей или обеспечивающей подсистемы зависит от назначения системы в данный момент или в данной ситуации.

Процессы управления описываются различными моделями. Управление в обязательном порядке включает планирование, организацию, мониторинг и контроль всех аспектов производства в ходе непрерывного процесса достижения его целей. Мониторинг (отслеживание в реальном масштабе времени) является обязательной фазой.

Определяются входные переменные и выходные параметры. Их составляющие – совокупность всех видов ресурсов, используемых в системе и совокупность видов продукции и услуг соответственно. Также определяются параметры управляющих воздействий, характеризующие условия протекания процесса. Они могут иметь положительные и отрицательные действия. Эти параметры (воздействия) нормируются организационными / организационно-распорядительными документами.

Рассмотрим некоторые вопросы системного анализа промышленной субмикронной технологии [9].

Системно подходу к изучению технологии производства интегральных микросхем, мы вынуждены охватить все аспекты технологических операций, эффективности и надежности оборудования, продолжительности процессов при обработке пластин, управление запасами и анализа полной стоимости собственности и себестоимости продукции, управления персоналом. При этом стало очевидным, что проблемы надежности продукции и ее низкой себестоимости невозможно устранить без учета выше отмеченных факторов и при использовании низкого качества материалов и дефектной разработке.

Система – совокупность связанных друг с другом приемов (методов) работы. При этом под этим приемом понимается заранее спланированная реакция на то или иное известное или ожидаемое состояние в процессе работы. Или система – сеть взаимосвязанных методов, как серия функций, действий и операций, ведущих к желаемому результату. Система как план в действии становится совокупностью всех действующих планов, объединяющих всех участников и все средства, необходимые для достижения цели.

Отдельные совокупности усилий, направленные на достижение целей, являются подсистемами, объединенными в одну главную систему.

Общая система – настоящая групповая деятельность, при которой все члены группы придерживаются одних и тех же правил игры. Оптимальная система выполняет свои функции (достигает своей цели) с минимальными затратами, в минимум времени и с максимальной эффективностью. Она способна приспосабливаться к изменениям условий, учитывая все предусмотренные варианты в пределах, предназначенных для нее. В ней есть необходимый механизм обратной связи, позволяющий немедленно обнаруживать и устранять любое отклонение от оптимального режима. Оптимальная система не оставляет места для случайностей. Необходима постоянная работа по поддержанию системы в состоянии оптимума.

И мы пришли к выводу о взаимосвязанности процессов. Эти процессы состоят из операций, следующих одна за другой в определенном порядке, в определенных количественных соотношениях и контролируемых с помощью обратных связей, преимущественно за счет отрицательной связи между конечным результатом и чувствительным к нему контрольным устройством.

Термин «технология» принял совершенно новое понимание. Более двадцати лет назад мы ввели понятие промышленной технологии производства ИС [10, 11]. Оно является эмпирическим обобщением извест-

ных и (по В. И. Вернадскому) «легко и точно наблюдаемых фактов».

По результатам системного анализа промышленной технологии (ПТ) сверхбольших интегральных схем (СБИС) мы установили, что она обладает всеми необходимыми ограничительными признаками систем [7]. В промышленной субмикронной технологии СБИС используется различное оборудование и материалы. Кроме материально-технических средств, она содержит в себе все время увеличивающийся запас информации.

Промышленная технология, как сложный процесс, может иметь набор взаимосвязанных целей. (См. диаграмму Исикавы – рис. 1). Цели и ресурсы взаимосвязаны.

Промышленная технология ИС обладает цельностью как система. Все ее составляющие элементы служат достижению единой цели: изготовлению интегральных микросхем при заданных входных воздействиях с помощью набора оптимизированных, скоординированных и согласованных выходов. Эта система является большой по количеству составляющих ее элементов, по количеству одинаковых частей, количеству реализуемых функций и цене. Она сложная, так как изменение какого-либо ее параметра приводит, как правило, к нелинейному изменению других параметров. Часть ее функций всегда выпол-

няется автоматизированным оборудованием, а часть всегда выполняется человеком.

Какова реакция системы на влияющие изменения? Даже при незначительных изменениях необходимо учитывать внешнюю среду, поскольку промышленная технология зависит от внешнего мира в отношении поставок ресурсов, энергии, кадров, а также потребителей. Необходимо уметь выявлять существенные факторы в окружении, которые повлияют на нее. Более того, необходимо предложить подходящие (соответствующие) способы реагирования на внешние воздействия. В некоторых случаях невозможно спрогнозировать реакцию системы в любой момент времени из-за случайного характера некоторых непредсказуемых входных действий, например, внешние условия. Внешняя среда включает экономические условия, потребителей, правительственные акты, законодательство, конкурентов, систему ценностей в обществе, общественные взгляды, технику и технологию. В то же время промышленная технология представляет собой целостность, состоящую из взаимосвязанных частей, в свою очередь, опутанных связями с внешним миром. Промышленная технология зависит от внешней среды, как в отношении ресурсов, так и в отношении потребителей, пользователей их результатами, которых они стремятся достичь. Из-за недостаточно оптимального управле-



Рис. 1. Диаграмма Исикавы системы «промышленная технология» [10–13]

ния или действия конкурентов возможно снижение эффективности системы.

Как определить границу между внутренней и внешней средой системы «промышленная технология»? Насколько сложна внешняя среда системы «промышленная технология»? Под сложностью среды понимается число факторов, на которые система обязана реагировать, а также уровень вариантности каждого фактора.

Насколько подвижна внешняя среда? Подвижность среды – это скорость, с которой происходят изменения во внешнем окружении системы. Скорость изменения технологии и параметров конкурентной борьбы в электронной промышленности выше, чем в других традиционных отраслях. Нужно использовать ситуационный анализ. Сравнить внутренний и внешний рынки. Подвижность внешнего окружения может быть выше для одних подсистем и ниже для других. Факторы внешней среды могут влиять на структуру (состав) системы. Например, технологический уровень.

Учитывая сложность функционирования в условиях высокоподвижной среды, система должна опираться на более разнообразную информацию для принятия эффективных решений относительно своих внутренних переменных.

Неопределенность внешней среды является функцией количества информации, которой располагает система по поводу конкретного фактора, а также функцией уверенности в этой информации. Неопределенность внешней среды зависит от количества и достоверности поступающей в систему ПТ информации. Какова чувствительность системы к факторам внешней среды?

При управлении такой системой, как промышленная технология, следует останавливаться на рассмотрении и обосновании факторов, при этом показать их переменчивость (вариантность).

Технологическая документация включает в себя описание техпроцесса и всех процедур, связанных с производством микросхем и его организацией. Она должна определить, как все устроено на самом деле, а не представлять так, как хочется по чьему-то указанию.

В результате вышеизложенного анализа технологии производства СБИС понятие «промышленная субмикронная технология СБИС» приобрело более широкий смысл [10, 11].

Промышленная технология микроэлектроники современного субмикронного уровня – это система, включающая в себя комплекс технологических операций, оборудование, условия производства, комплекс методов и средств моделирования, проекти-

рования, диагностики и контроля, управление и персонал. Эта система работает в полном взаимодействии с внешней средой. Условием существования этой системы является превышение денежных доходов над расходами. Функцией состояния этой системы в целом (критерием оптимальности) является эффективность затрат S .

$$S = \Delta P / \Delta M,$$

где S – эффективность затрат, ΔP – изменение выпуска СБИС за требуемый период, ΔM – все расходы, проведенные для объема производства ΔP СБИС.

В случае неадекватности уровней составляющих этой системы в ней протекают неравновесные процессы, сопровождающиеся ростом рентабельности, выхода годных, и в состоянии равновесия критерий оптимальности достигает максимума. При этом издержки производства минимальны. В случае соответствия уровней всех составляющих системы она находится в равновесном состоянии. В этом случае, параметры всех составляющих системы статистически постоянны, выход годных максимален, издержки производства минимальны, а эффективность затрат и рентабельность максимальна.

Функцией управления является оптимизация системы. Обязанность управления должно входить поиск возможностей расширения границ его системы, как для обеспечения условий ее наилучшего функционирования, так и для извлечения наибольшей прибыли. Оптимальная система выполняет свои функции (достигает цели) с минимальными затратами, в минимум времени и с максимальной эффективностью. Она способна приспосабливаться к изменениям условий, учитывая все предусмотренные варианты в пределах, предназначенных для нее. В ней есть необходимый механизм обратной связи, позволяющий немедленно обнаруживать и устранять любое отклонение от оптимального режима. То есть, она не оставляет места для случайностей. Только постоянная работа, направленная на поддержание системы в состоянии оптимума, может предотвратить неизбежность проведения срочных программ по восстановлению ее эффективности.

Вопросы создания и внедрения промышленной субмикронной технологии СБИС напрямую связаны с экономикой. Именно результаты анализа экономических показателей являются главной побудительной основой тех или иных инженерных решений. Анализ экономических показателей сводится к прогнозу доходов и расходов, и их отношения. Расходы зависят от затрат на создание технологии и производства, ресурсов, требуемых оборотных средств, выхода годных, времени обучения, потребительских свойств СБИС, параметров производства, длительности технологического цикла, структуры плана производства, прогноза цены, времени выхода на рынок. Доходы от внедрения промышленной субмикронной технологии СБИС будут зависеть от времени создания проекта, времени поступления дохода, потребительских свойств продукции, прогноза рыночного спроса и предложе-

ния, ценовых отношений между запрашиваемой и предлагаемой продукцией, технико-экономических характеристик производства.

Очевидно, что промышленная субмикронная технология, равно как и ее отдельные составные части, являются объектами управления и оптимизации. Техпроцесс должен формализоваться, то есть описываться математически на основании аналитических зависимостей характеристик изделий от технологических параметров. Поэтому полученные модели различных уровней системы являются не только средством адекватного описания и исследования различных свойств этого объекта, но, что чрезвычайно важно, являются необходимой основой для математической формулировки целевых функций и критериев управления и оптимизации, накладываемых на них ограничений, построения вычислительных алгоритмов и т. д.

Наше определение промышленной технологии включает в себя гораздо больший круг вопросов, чем это принято в деятельности специалистов, разрабатывающих, изготавливающих, контролирующих процесс создания интегральных микросхем и обеспечивающих работу оборудования. Например, технологи всегда сталкиваются с прогнозированием выхода годных, разработчики – с адекватностью правил и средств проектирования, контролеры – с системами измерения, контроля, сбора и обработки данных, специалисты по оборудованию – с обеспечением его надежности. Однако никто из них не сталкивается со всеми вопросами, затронутыми в нашем определении промышленной технологии.

Роль управления в процессе производства ИС постоянно возрастает, особенно в последнее время. Связано это с высокими требованиями по выходу годных, к цене, качеству, с возросшей стоимостью многих ресурсов, с ростом объема информации о соответствующих рынках для прогнозирования спроса и предложения. Изменились также условия поиска потребителя. Требуется заключение долгосрочных союзов с потребителями и поставщиками и оценка их возможного вклада в перспективное развитие производства. Управленцы участвуют в обсуждении новых технологий с точки зрения их новых возможностей.

Задача управления или оптимизации промышленной субмикронной технологии, как в целом, так и ее отдельных элементов и составляющих формулируется следующим образом [12, 13]. Технологический процесс (или его этап) рассматривается как объект, на вход которого поступает вектор $X(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$ входных переменных, а скалярная целевая функция F характеризует его качество. Требуется найти такой вектор управляющих воздей-

ствий $R^*(t) = (R_1(t), \dots, R_n(t))$, который, во-первых, минимизирует значение показателя F , то есть:

$$F(X(t), R^*(t)) = \min_{R(t)} [F(X(t), R(t))],$$

и, во-вторых, удовлетворяет требованиям и ограничениям на систему его выходных контролируемых параметров, которые не должны выходить за установленные пределы:

$$h_j(t) \leq b_j, j=1, \dots, m,$$

где b_j – требуемые и допустимые значения соответствующих выходных параметров.

Таким образом, мы имеем задачу определения оптимального вектора управления $R^*(t)$, минимизирующего целевую функцию $F(X(t), R(t))$ при условии выполнения заданных ограничений. Эффективность оптимизации любого объекта управления, в том числе и такого как «промышленная субмикронная технология» в первую очередь определяется правильным выбором критериев и целевых функций.

В нашем случае основную группу критериев составляют стоимостные:

$$F = \sum_{i=1}^p F_i,$$

где F_i – затраты на выполнение i -го этапа, операции; p – число этапов, операций.

Значения этого критерия зависят от процента выхода годных изделий, производительности используемого оборудования и, в отдельных случаях, ряда других частных критериев.

До последнего времени выход годных определяли, как зависимость от двух основных факторов – дефектов окружающей среды и статистического разброса параметров элементов ИС и технологического процесса. Математически общий выход годных микросхем $Y_{ИС}$ описывался как функция вероятностей бездефектности Y_D и воспроизводимости процесса Y_B :

$$Y_{ИС} = Y_D(DA) \cdot [Y_B(\sigma, \Delta)]^n.$$

Все процессы изготовления подвержены случайным дефектам и выход годных снижается экспоненциально в зависимости от размера кристалла ИС. Установлена связь между выходом годных и плотностью дефектов при изготовлении. Выход годных Y_D зависит от плотности дефектов D и площади кристалла A и в общем виде может быть представлен как:

$$Y_D = \exp(-AD).$$

Параметр Y_B является вероятностью воспроизводимости (соответствия) отдельных элементов микросхемы требованиям технического задания на проектирование. Он зависит, в частности, от точности реализации физической структуры ИС при

изготовлении (σ) и, соответственно, от технологических запасов (Δ), то есть параметры каждого элемента ИС должны находиться в пределах заданных требований. Отсюда и зависимость процента выхода годных от степени интеграции ИС. Для симметричных допусков [14]:

$$Y_B(\sigma, \Delta) = 2F\{(\Delta - m)/\sigma\} - 1,$$

где F – функция нормального распределения, m – математическое ожидание.

При увеличении степени интеграции σ уменьшается, а плотность распределения вероятности искомой величины растет. При большой степени интеграции вероятность Y_B не должна быть такой, чтобы стремиться Y к нулю. Например, для кристалла с $p > 10^2$, предполагая нормальное распределение некоторых электрических параметров, отклонения σ должны быть в 6,2 раза меньше, чем приемлемый проектный вариант, чтобы иметь выход годных более 50%. Конечно, это обеспечивается высокой воспроизводимостью и прецизионностью технологических операций и уровнем проектирования микросхем.

Стадия промышленной технологии не требует и даже отвергает попытки доводки параметров управления процессом. Качественное изделие создается, если с начала и до конца технологического процесса в него не вносятся никаких изменений или исправлений. Требование на этом этапе жизни технологии – воспроизводимость и определенность. Техпроцесс строго регламентирован. Каждому необходимо делать только то, что положено делать на основании организационной документации и объективных информационных данных.

При управлении процессом особое значение приобретает управление по отклонениям контрольных объектов (причинные факторы, подлежащие проверке). Задача состоит в установлении источников сбоев, связанных с причинными факторами. Корректирующие воздействия направлены на устранение причин повторяющихся отклонений. Такой подход помогает предвосхитить проблемы и предотвратить их возникновение. Таким образом, на этой стадии производства контролируются факторы, влияющие на возникновение дефектов, что позволяет сэкономить значительные средства на контроль.

Эффективность производства ИС связана с определенными требованиями к технологическому процессу и оборудованию. Техпроцесс должен быть непрерывным, базироваться на минимально возможном количестве однородных по физико-химическому принципу операций, обладать соответствующей разрешающей способностью на каждой операции, иметь контроль определяющих параметров на каждой операции, предусматривать экспресс-контроль пластин,

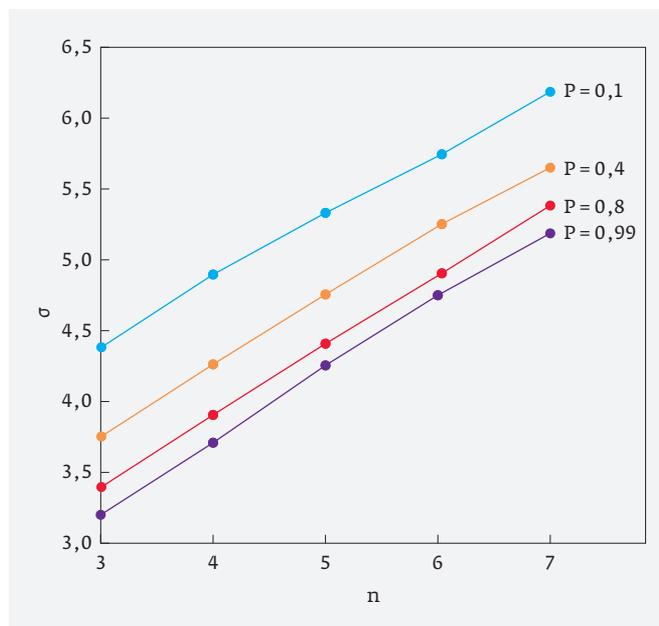


Рис. 2. Зависимость точности реализации физической структуры ИС при изготовлении (s) от степени интеграции при различных задаваемых значениях процента выхода годных ИС [12]

как в процессе, так и после, не допускать неконтролируемого воздействия на пластины внешней среды. При этом техпроцесс должен обладать высокой энергетической эффективностью, то есть потреблять минимально возможное количество энергии на проведение каждой операции, быть малоотходным или безотходным.

Промышленная технология стала принципиально новым для российской микроэлектроники, и не только для нее, предметом и объектом изучения. Ее отличие от предметной технологии заключается в изучении закономерностей формирования (организации) и проведения процессов создания интегральных микросхем. Промышленная технология направлена на решение проблем создания, оптимизации и совершенствования процессов с целью наиболее полного выполнения ожиданий.

Есть много разных концепций. Соответственно, разные авторы поддерживают тем или иным способом свою. Отбирают материалы, вписывающиеся в схему. Тенденциозность подбора приводит не к науке, а к публицистике. Не полученные знания, а порожденные часто становятся заблуждением и даже лженаукой. Выработка основных принципов организации технологического процесса и разработка оптимальной, технологически реализуемой и относительно дешевой СБИС с субмикронными разме-

рами невозможны без единого комплексного подхода, включающего в себя рассмотрение всей совокупности проблем. Деятельность заключается в достижении отдельных целей одновременно с максимальным участием в выполнении всех связанных с этим отдельных задач и достижением тем самым главной цели, поставленной перед системой. Для этого необходимы: большая подготовительная работа, глубокие знания и понимание составляющих компонентов системы, взаимосвязей между этими компонентами, стоимостных отношений как имеющихся, так и доступных к получению устройств и оборудования, испытанных и возможных методов и способов, и, наконец, всей системы в целом.

Изучая комплексно промышленную технологию, мы познаем ее состав и суть составных элементов. Из этой сути мы выделяем главное, являющееся определяющим на том или ином этапе развития. В терминах и связях, образующихся во время становления и развития промышленной технологии, замечаем ранние зачатки идей, где-то соприкасающихся, где-то завызывающихся. Эти проблемы более детально рассматриваются в [15–17].

Увеличение объема знаний и возникновение новых технологий создают реальную возможность и требования заниматься технологией всерьез, как наукой. Технология объективно имеет положительную обратную связь с наукой. Современные технологии появляются как результат исследований и открытий в науке, которые передаются технологам. Если результаты оказываются продуктивными, исследования будут немедленно «усилены». Связь при контакте ученых и технологов положительна всегда, так как даже отрицательное отношение технологов к какому-нибудь результату научной деятельности никогда не прекратит исследования, по крайней мере, для выяснения причин отрицательной реакции и исправления ситуации. В то же время от науки требуется выявление фундаментальных закономерностей процессов.

Так, микроэлектроника, из раздела электроники, связанного «с изучением и производством электронных компонентов с геометрическими размерами характерных элементов порядка нескольких микрометров и меньше» или «область электроники... , занимающаяся созданием электронных функциональных узлов, блоков и устройств в микроминиатюрном интегральном исполнении» [18], все больше становится наукой о материалах и технологических процессах, и это открывает перед ней новые горизонты как в области фундаментальных знаний, так и в технике.

Нам известна динамика возникновения новой технологии от ее появления до кульминации и заката.

Новая технология что-то берет от уже существующей. При этом заимствование в начале преобладает, а новое даже примитивно. Оно с трудом на первых этапах выдерживает конкуренцию с тем, что существует давно и оптимально приспособлено к предъявляемым требованиям. (Например, сплавной германиевый или даже кремниевый диод или транзистор, гибридный модуль – микросхема и т.п.). По мере усложнения технологии, повышения ее уровня она развивается, во-первых, в направлении совершенствования всех составляющих процессов, как последовательных, так и параллельных, и, во-вторых, в повышении уровня их координации. При этом как сами процессы, так и их взаимодействие и взаимовлияние должны быть четко описаны, охарактеризованы и нормированы. И это распространяется как на отдельные операции, так и на группу операций, и на процесс в целом. Но стабильная ситуация меняется из-за, казалось бы, небольших изменений внешней среды, и начинается быстрое развитие новой технологии.

Наука узнает новое, а технология создает новое. Объекты изучения различны и это будет всегда. Бесплезных и лишних знаний нет, хотя зачастую нам не дано предугадать, какое знание пригодится и, более того, окажется необыкновенно нужным и важным. По А. М. Уголеву, общее представление о технологии превращается в науку о принципах, структуре и динамике организованных процессов [19].

Новая технология начинает доказывать свое превосходство над конкурирующими в «борьбе за существование» в части качества, стабильности, воспроизводимости. И, как только она входит в свободную, никем не занятую область, начинается ее бурное развитие. Исчезают всякие остатки примитивизма, появляются новые и даже принципиально новые решения, смело предлагающие новые функции и новые возможности. И таким образом эта технология развивается и становится тем, что даже дает название эпохе своего существования. Этот период тянется довольно долго, до тех пор, пока не исчезнут ее возможности обеспечения стабильного устойчивого развития и равновесия.

Но, это еще не поражение. Эволюционная динамика начинает приобретать новые, ранее не отмеченные характеристики и функции. Ответвления будут пытаться проникнуть в области с низкой конкуренцией. И это может быть весьма успешным, в том числе за счет синергетического эффекта. И даже при исчезновении главной технологической ветви, ее ответвления могут найти благоприятные условия своего развития почти без изменений.

Физические знания, развитие которых сейчас зачастую стимулируется требованиями создания новых продуктов и производства, будут всегда шире и фундаментальнее знаний, присущих, например, технологиям микроэлектроники. Объектом изучения физики является вся окружающая среда. Объектом же той же микроэлектроники являются искусственно создаваемые человеком интегральные микросхемы, темпы развития функциональных возможностей которых потрясают. В пору говорить о создании искусственного разума. Чтобы построить разум, надо знать, что это такое, а чтобы узнать, что такое разум, его надо построить!

Первые микросхемы были примитивны, как были примитивны первые паровые машины, автомобили, самолеты.

Микросхема вытеснила не только печатную плату, типовой элемент замены (ТЭЗ). Но и даже компьютер. Но в то же время современная цифровая интегральная микросхема, начинает защищаться от нейроморфных систем. При этом как цифровая, так и тем более и нейроморфная микросхемы еще не достигли своей высшей фазы.

Таким образом, промышленную технологию микроэлектроники нужно определить как науку, и как практическую деятельность по организации и управлению процессами создания изделий микроэлектроники с целью минимизации совокупных затрат при максимально возможном полезном эффекте.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. https://studopedia.ru/3_115275_vidi-promishlennih-tehnologiy.html
2. **Минаев Э.С., Агеева Н.Г., Аббата Дага А.** Управление производством и операциями. – М.: Инфра-М, 2000.
3. Большой энциклопедический словарь. – М.: Большая российская энциклопедия, С-Пб, «Норинт», 1997.
4. ИСО 8402:1994 «Управление качеством, обеспечение качества». Словарь.
5. Политехнический словарь. – М.: Большая российская энциклопедия, 2000.
6. **Егоров Ю.Л.** Сложность: сущность, подходы и методы исследования // Известия ВУЗов. Электроника. 2000. № 4-5. С. 179.
7. Справочник по системотехнике / Под ред. Шилейко А.В. – М.: Советское радио, 1970.
8. **Ishikawa K.** What is Total Quality Control? The Japanese way., Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1985 Kaoru Ishikawa, What is Total Quality Control? The Japanese way., Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1985.
9. **Ellis D.O., Ludwig F.J.** Systems Philosophy, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1962.
10. **Горнев Е.С.** Промышленная субмикронная технология СБИС : Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 1998. С. 81.
11. **Горнев Е.С.** Промышленная субмикронная технология СБИС : Автореферат диссертации в виде научного доклада на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 1998.
12. **Горнев Е.С.** Разработка и внедрение промышленной субмикронной технологии СБИС : Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Специальность 05.27.01. – твердотельная электроника, микроэлектроника и наноэлектроника. – М., 2000. 487 с.
13. **Горнев Е.С.** Разработка и внедрение промышленной субмикронной технологии СБИС : Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – М., 2000.
14. **Ликет И., Ляга И.** Основные таблицы математической статистики. – М.: Финансы и статистика, 1985.
15. **Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В.** Общая теория технологии и микроэлектроника: Часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2017. Вып. 1 (165). С. 51–69.
16. **Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В.** Общая теория технологии и микроэлектроника: Часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2017. Вып. 4 (168). С. 16–41.
17. **Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В.** Общая теория технологии и микроэлектроника: Часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2018. Вып. 3 (171). С. 63–93.
18. Большой энциклопедический политехнический словарь, 2004 (БСЭ).
19. **Академик А.М. УГОЛЕВ.** Естественные технологии биологических систем // Академия наук СССР, Серия «Наука и технический прогресс». – Л.: «Наука» Ленинградское отделение, 1987.

Место фазосдвигающих фотошаблонов в современной полупроводниковой технологии

► Н. Н. Балан, В. В. Иванов, А. В. Кузовков, Е. С. Шамин
АО «НИИМЭ»

Статья посвящена применению фазосдвигающих шаблонов в современной полупроводниковой технологии. Сделан обзор различных видов используемых фазосдвигающих структур. Описаны принципы функционирования основных типов фазовых фотошаблонов, рассмотрены их достоинства и недостатки, а также место в мировом рынке фотошаблонов.

Phase Shifting Masks in Modern Semiconductor Technology

N. N. Balan, V. V. Ivanov, A. V. Kuzovkov, E. S. Shamin

MERI SC

This article discusses phase-shift masks usage issues in modern semiconductor technology. An overview of different types of phase-shifting patterns has been made. Key principles of various phase-shift mask functioning were described. Advantages and disadvantages of their usage were considered as well as their position on the global photo-mask market.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно из оптики, использование искусственно привнесенной фазовой компоненты входного изображения способно существенно повлиять на свойства изображения на выходе оптической системы за счет перераспределения энергетических и фазовых характеристик дифракционных порядков (гармоник) входного изображения [1].

На этом основан один из наиболее эффективных методов повышения эффективности проекционной фотолитографии, предложенный в начале 80-х годов прошлого века [2], – применение фазосдвигающих

фотошаблонов (ФШ) или PSM (Phase Shift Mask), позволяющих, помимо (или вместо) амплитуды рабочего излучения, модулировать его фазу, благодаря чему достигается значительное улучшение разрешающей способности и глубины фокуса проекционной фотолитографии в сравнении с вариантом использования бинарных фотошаблонов или BIM (Binary Intensive Mask).

В настоящей статье будет описана сущность методики, основные виды применяемых в настоящее время фазосдвигающих ФШ и их место в современной полупроводниковой технологии.

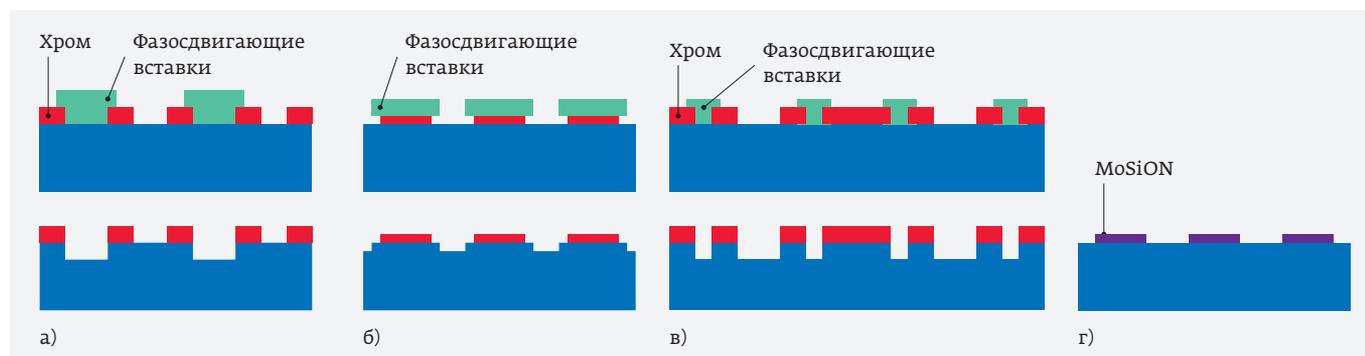


Рис. 1. Конструкция различных структур фазового сдвига: а – чередующейся (ALT), б – окаймляющей (RIM), в – аутриггера (OTR) и г – ослабляющей (ATT)

Таблица 1. Типы фазосдвигающих структур по [5]

Тип фазосдвигающей структуры	Альтернативное название	Вид ФШ	Категория	Область применения
Чередующаяся (ALT)	Levenson	AAPSM	Сильный	Групповые темные и светлые линии
Окаймляющая (RIM)		AAPSM	Слабый	Контакты, переходные отверстия, изолированные структуры
Ослабляющая (ATT)	Embedded	EAPSM	Слабый	Одиночные и групповые темные и светлые линии, контакты, переходные отверстия, изолированные структуры
Фазовая ступенька (CPL)	chromeless, unattenuated	AAPSM	Сильный	Одиночные узкие линии
Аутриггер (OTR)	subresolution	AAPSM	Слабый	Изолированные структуры
Вихревая (Vortex)		AAPSM	Сильный	Контакты и переходные отверстия

КЛАССИФИКАЦИЯ ФАЗОСДВИГАЮЩИХ СТРУКТУР, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Фазосдвигающие фотошаблоны активно используются в технологии СБИС, начиная с проектных норм 130 нм. При их разработке применяются, по крайней мере, шесть вариантов фазосдвигающих структур, рассмотренных Г. Левинсоном в книге [5]. Эти варианты сведены в табл. 1. Так или иначе все они происходят из работы [2].

На рис. 2. изображены в сечении конструкции четырех приведенных в табл. 1 фотошаблонных структур, осуществляющих фазовый сдвиг: чередующейся (ALT), окаймляющей (RIM), аутриггера (OTR) и ослабляющей (ATT).

Фазосдвигающие элементы могут быть сформированы различным образом. Например, для структуры ALT (рис. 1а) они могут быть нанесены в виде специальных фазосдвигающих «вставок» или вытравлены в кварцевой подложке ФШ в виде канавок глубиной $\lambda / 2(n-1)$, где n – показатель преломления кварца, а λ – длина волны используемого излучения (в этом случае вращение фазы составит 180°).

Структура типа «аутриггер» (OTR) может рассматриваться как усовершенствованный вспомогательный непропечатываемый элемент (или SRAF – SubResolution Assist Feature), дополненный фазосдвигающей областью (рис. 1в).

Вихревая фазосдвигающая структура (Vortex) схематично изображена на рис. 2. Это одна из самых сложных в практической реализации структур, содержащая четыре градации фазы. Как будет

показано ниже, место смыкания областей входного изображения, отличающихся по фазе на 180° , дает на выходе чрезвычайно узкий участок затемнения. Следовательно, подобная структура позволяет эффективно формировать литографические слои близко расположенных контактных окон или переходных отверстий при условии использования негативного фоторезиста. Иногда в топологию вносятся дополнительные поглощающие области (рис. 2б). Это делается для получения окон требуемого размера.

Подход к созданию «ослабляющих» фазосдвигающих структур (ATT) состоит в формировании рисунка по тому же принципу, что и в бинарных ФШ, при этом для создания темных элементов используется слой специального фазосдвигающего материала, который частично пропускает свет (рис. 1г).

Это может быть полупрозрачный тонкий слой хрома, работающий в комбинации с фазосдвигающим слоем, сформированным, например, при помощи того же локального травления кварцевой подложки. Используются также фазосдвигающие

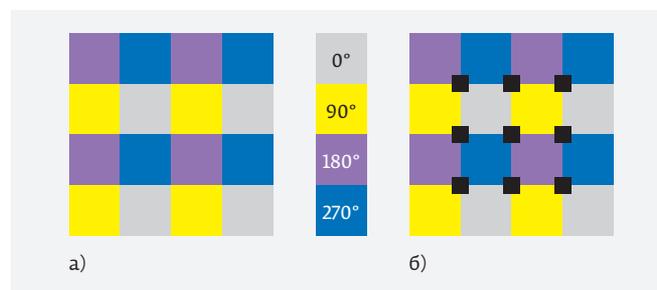


Рис. 2. Конструкция вихревой фазосдвигающей структуры (Vortex)

слои из других материалов, таких как CrO, CrOH, MoSiO, MoSi, MoSiON. Коэффициент пропускания слоев на основе силицида молибдена (используемых при производстве коммерческих фотошаблонных заготовок) составляет, как правило, 6% по интенсивности прошедшего света, встречаются также слои с 18%-ным пропусканием. Поворот фазы для таких структур, как правило, составляет те же 180°, что и в случае структуры ALT. Фазосдвигающие структуры такого типа считаются, по принятой в [5] классификации, «слабыми» (см. табл. 1), однако огромные преимущества, состоящие в простоте расчета и использования, а также в технологичности изготовления, делают фотошаблоны на их основе наиболее широко применяемыми в современных коммерческих технологиях производства интегральных схем.

Фазосдвигающие структуры RIM, CPL, OTR и Vortex, приведенные в табл. 1, вполне можно считать частными случаями структуры ALT. Таким образом, для удобства можно рассматривать только два вида структур: ALT (с чередующейся фазой) и АТТ (ослабляющие). Стоит отметить, что структуры, относящиеся к ALT, практически никогда не комбинируются на одном фотошаблоне с АТТ (хотя крайне редко такая возможность и может быть рассмотрена). Поэтому в данном случае можно говорить о двух категориях фазовых фотошаблонов – ААPSM (Alternating aperture phase shift mask) и ЕАPSM (Embedded attenuated phase shift mask). Далее в статье будут подробно рассмотрены эти две категории фазовых ФШ и описан принцип их применения.

ФОТОШАБЛОНЫ С ЧЕРЕДОВАНИЕМ ФАЗЫ (ААPSM). БЕСХРОМОВЫЕ ФШ. МЕТОД CPSPM (COMPLEMENTARY PHASE SHIFTING MASK)

Как известно, бинарный фотошаблон (ВІМ), содержащий группу непрозрачных параллельных периодических линий с периодом p , при освещении нормально падающей плоской ТЕ-волной длины λ (осевое точечное освещение) формирует дифракционную картину дискретных порядков (рис. 3а), отстоящих друг от друга в плоскости пространственных частот на расстояние, пропорциональное $1/p$ (рис. 4а). В силу конечных размеров объектива пространственные частоты высших порядков отсекаются, что ухудшает качество воспроизводимого изображения.

Для линий достаточно малого периода наблюдается отсечка всех порядков, кроме нуле-

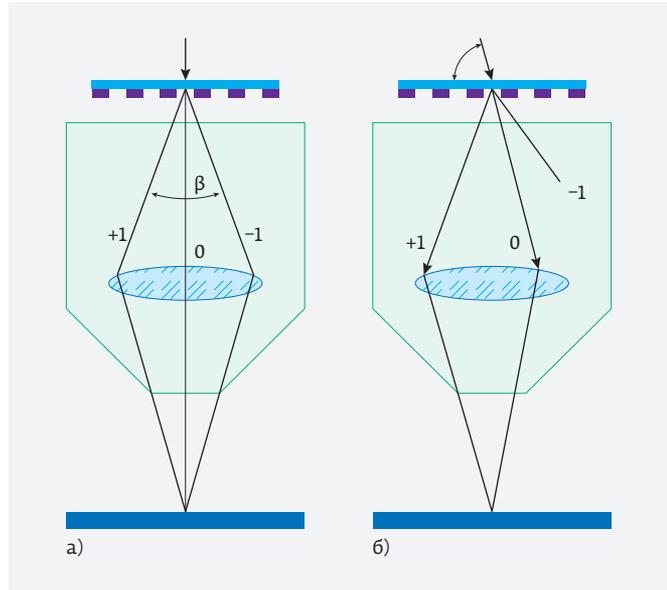


Рис. 3. К объяснению механизма отсечки дифракционных порядков и принципа внеосевого освещения фотошаблона: а – отсечены все порядки дифракции, кроме 0-го и ± 1 -х, – трехпучковое формирование изображения; б – внеосевое точечное освещение – двухпучковое формирование изображения (в случае нормального падения освещающей волны, как в случае (а), ± 1 -е порядки дифракции отсечены и изображение отсутствует)

вого и первых, и в этом случае нормированное распределение интенсивности излучения, прошедшего через объектив, в плоскости изображения дается формулой (1) [6]. Предполагается, что кратность объектива равна единице.

$$I(x) = \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi} \cos(2\pi x / p) + \frac{4}{\pi^2} \cos^2(2\pi x / p) \quad (1)$$

Первый член правой части в (1) соответствует равномерной засветке, второй (несущий основную информационную составляющую) есть результат интерференции первых порядков с нулевым. Третий член обусловлен интерференцией первых порядков между собой и вносит в результирующее изображение гармоническую компоненту двойной частоты, повышая контраст изображения.

Пространственная частота отсечки ± 1 -порядков дифракции, обусловленная конечными размерами оправы объектива, равна по модулю NA/λ , где λ – длина волны экспонирующего излучения, $NA = n \sin \theta$ – числовая апертура объектива (θ – апертурный угол, n – показатель преломления среды). Таким образом, при использовании бинарного фото-

шаблона с осевым пространственно-когерентным (точечным) освещением разрешаемый период линий не может быть менее λ/NA , поскольку в этом случае изображение исчезает вовсе.

Использование в этом случае внеосевого точечного освещения (рис. 3б) позволяет добиться попадания в объектив вместе с нулевым как минимум одного из ненулевых порядков дифракции, что приводит к восстановлению полезного сигнала. Таким образом, внеосевое освещение позволяет вернуть изображение, пусть и за счет некоторой потери его контраста.

Рассмотрим теперь похожий ФШ, отличающийся от предыдущего тем, что в каждый второй промежуток между линиями добавлена прозрачная вставка, поворачивающая фазу излучения на 180° (рис. 4б). Как уже было сказано, то же самое может быть сделано за счет дополнительного протравывания на глубину $\lambda/2(n-1)$.

Допустим, что w – ширина светлого промежутка между линиями. Дифракционная картина, создаваемая такой решеткой, может рассматриваться как суперпозиция картин от двух решеток с периодом $2p$, сдвинутых друг относительно друга на расстояние p , у одной из которых коэффициент пропускания прозрачного участка по амплитуде равен 1, а у другой – -1 (по причине сдвига фазы на 180°).

Нетрудно заметить, что в этом случае четные порядки дифракции от двух рассматриваемых решеток гасят друг друга, а результирующее выражение для амплитуды дифракционной картины в плоскости пространственных частот будет выглядеть следующим образом [4]:

$$T_m(f_x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} a_j \delta(f_x - \frac{j}{2p}), \quad (2)$$

$$\text{где } a_j = \begin{cases} 0, & j \text{ четное} \\ \frac{2 \sin(j\pi w / 2p)}{j\pi}, & j \text{ нечетное} \end{cases}.$$

И, соответственно, в случае малых периодов, когда в формировании изображения не участвуют высшие порядки дифракции, при условии пространственно-когерентного (точечного) освещения ТЕ-волной результирующая интенсивность в выходной плоскости объектива определится выражением (3):

$$I(x) = 2a_1^2 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \right), \quad a_1 = \frac{2 \sin\left(\frac{\pi w}{2p}\right)}{\pi}. \quad (3)$$

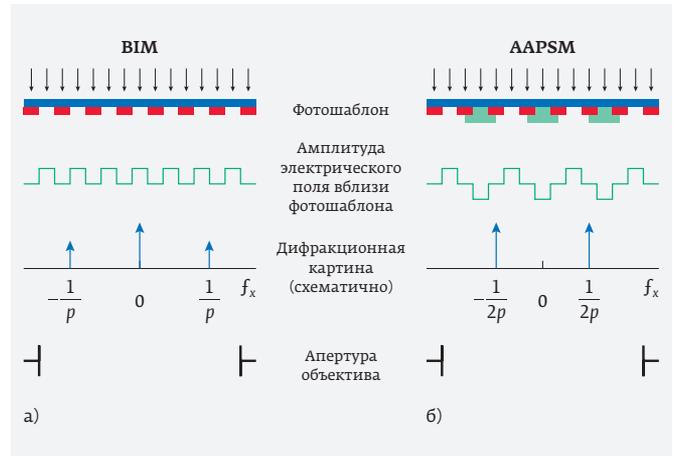


Рис. 4. К объяснению принципа применения ФШ с чередующейся фазой (AAPSM)

Минимальный разрешаемый период линий будет в этом случае равен $0,5\lambda/NA$. Таким образом, использование ФШ с чередованием фазы приводит, как и при внеосевом освещении, к двухпучковому формированию изображения, что, в свою очередь, одновременно улучшает разрешение, и глубину фокуса. Кроме того, формирующие изображение пучки имеют одинаковую интенсивность, что дает максимальный контраст изображения.

В отличие от использования внеосевого освещения, данный метод показывает высокую эффективность для линейчатых структур любого периода и даже для одиночных темных линий. Рассмотрим изолированную темную линию шириной w , светлые области по разные стороны от которой отличаются по вносимому фазовому набегу на 180° (рис. 5).

В случае точечного осевого освещения амплитуда дифракционной картины от такой структуры определится выражением:

$$T_m(f_x) = i \frac{\cos(\pi f_x w)}{\pi f_x}, \quad (4)$$

а распределение интенсивности в выходной плоскости:

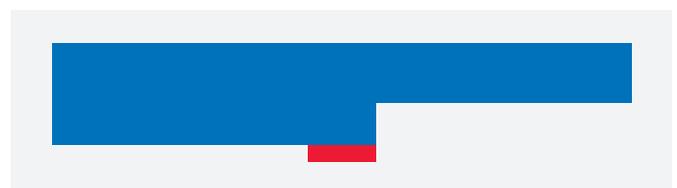


Рис. 5. Одиночная темная линейчатая структура на ФШ с чередующейся фазой

$$I(x) = \frac{1}{\pi^2} \left[\text{Si} \left(\frac{2\pi NA}{\lambda} (x + w/2) \right) + \text{Si} \left(\frac{2\pi NA}{\lambda} (x - w/2) \right) \right]^2, \quad (5)$$

где $\text{Si}(\theta) = \int_0^\theta \frac{\sin z}{z} dz$.

Очень интересный эффект возникает, когда w обращается в ноль, и структура превращается в простую фазовую ступеньку. В этом случае в выходной плоскости формируется темная линия с шириной, значительно меньшей, чем длина волны используемого излучения.

На рис. 6 показано распределение интенсивности для случаев $w=0$ и $w=50$ нм, а на рис. 7 – зависимость приведенной ширины линии воздушного изображения от ширины одиночной темной линейной структуры в хроме на ФШ с чередующейся фазой при пороге относительной интенсивности 0,25.

На этом принципе работают так называемые бесхромовые ФШ, которые дают возможность формирования в резисте крайне узких линий. Из рис. 6 и рис. 7 видно, что ширина линии воздушного изображения, даваемая фазовой ступенькой при пороге относительной интенсивности 0,25, составляет около $0,25\lambda/NA$.

Однако, в силу так называемых фазовых конфликтов подобные ФШ (как, впрочем, и любые ФШ с чередованием фазы) хороши для формирования замкнутых линий без перемычек и могут эффективно использоваться лишь в связке со специальными вспомогательными бинарными фотошаблонами, задача которых состоит в формировании

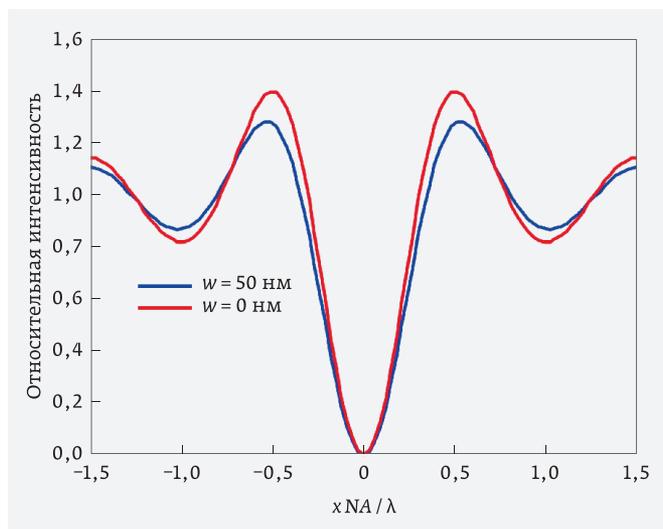


Рис. 6. Распределение интенсивности, даваемое одиночной темной линией шириной w на ФШ с чередующейся фазой при $w=50$ нм и при $w=0$ нм (случай фазовой ступеньки)

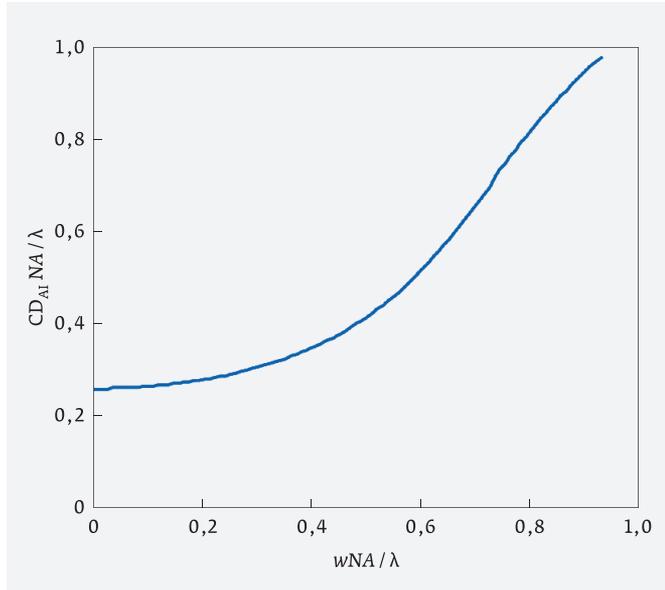


Рис. 7. Зависимость приведенной ширины линии воздушного изображения (при пороге относительной интенсивности 0,25) от ширины одиночной темной линейной структуры в хроме на ФШ с чередующейся фазой

крупных или удалении лишних элементов рисунка (метод cPSM).

Сущность «фазовых конфликтов» при использовании ФШ с чередованием фазы состоит в том, что для ряда структур невозможно корректно выбрать области фазового сдвига. Два типичных примера таких структур изображены на рис. 8. Рисунок не требует дополнительных пояснений. Фазовые конфликты – основной недостаток ФШ с чередующейся фазой.

Метод cPSM (Complementary Phase Shifting Mask) [7, 8] состоит в разделении топологии критического слоя на два фотошаблона – ФШ с чередующейся

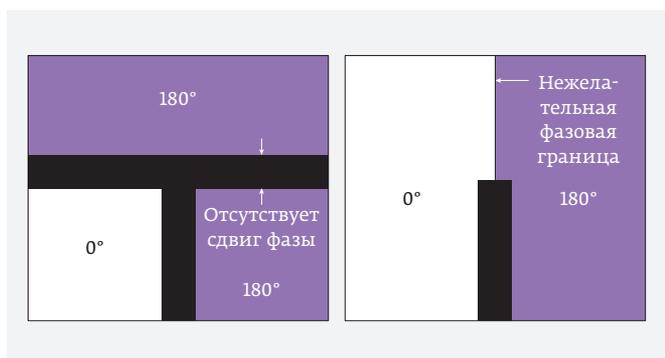


Рис. 8. К объяснению проблемы фазовых конфликтов при использовании ФШ с чередующейся фазой

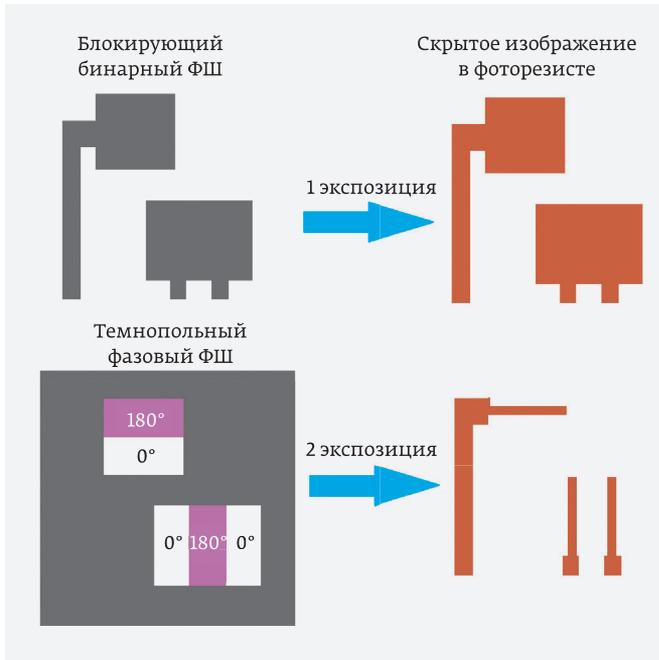


Рис. 9. Формирование затворных структур при помощи sPSM с темнопольным фазовым ФШ

фазой и вспомогательный бинарный ФШ («тримминговый» или «блокирующий») (рис. 9–10).

Используемые фазовые и бинарные фотошаблоны могут быть темнопольными или светлопольными в зависимости от того, как разработан процесс лито-

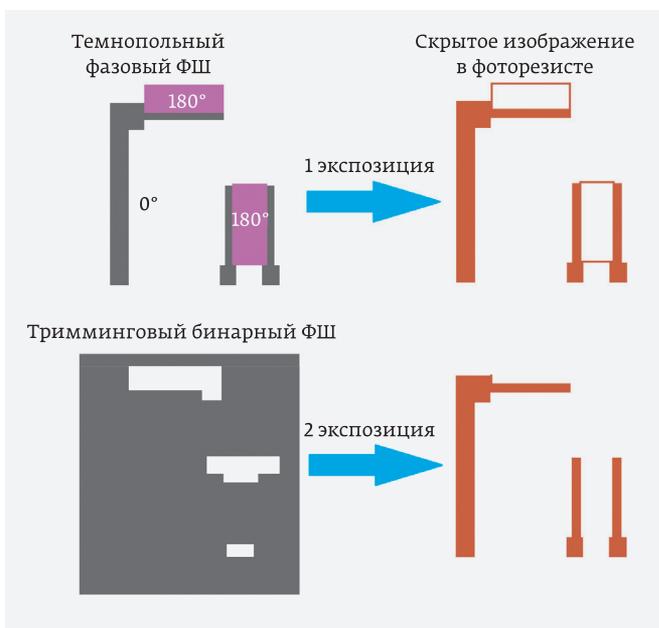


Рис. 10. Формирование затворных структур при помощи sPSM со светлопольным фазовым ФШ

графии. ФШ с чередованием фазы формирует критические структуры малых размеров, а вспомогательный бинарный фотошаблон отвечает за крупные структуры изображения, а также за удаление лишних элементов, неизбежно вносимых фазовым ФШ. При этом между двумя экспозициями отсутствует операция проявления.

Бинарный ФШ называется «блокирующим», если экспозиция этим шаблоном производится перед пропечаткой фазовым ФШ. Если процесс организован в обратном порядке, то вспомогательный бинарный фотошаблон называется «тримминговым». Преимуществом этого метода является то, что все процессные параметры проекционной системы (NA, параметры внеосевого освещения, доза, элементы OPC) могут быть независимо оптимизированы для каждого шаблона, что позволяет повысить управляемость описанного технологического процесса. Недостаток метода состоит в том, что на формирование структур требуется больше времени, чем при единственной экспозиции.

Имеется, впрочем, возможность избежать двойной экспозиции, но тогда для создания рисунка необходимо использовать фазосдвигающий фотошаблон, имеющий три градации фазы (рис. 11). Фазовый сдвиг в 90° не формирует изображения необходимого контраста (как и в случае вихревой фазосдвигающей структуры) и, следовательно, не оказывает влияния на резистную маску. Но стоимость такого ФШ значительно превышает стоимость ФШ с двумя градациями фазы (который сам по себе весьма дорог), а требования к топологии переносимых на пластину структур не всегда могут обеспечить возможность его изготовления.

Описанная методика позволяет добиться впечатляющих результатов. Минимальные размеры затворов транзисторов могут быть уменьшены до 25 нм

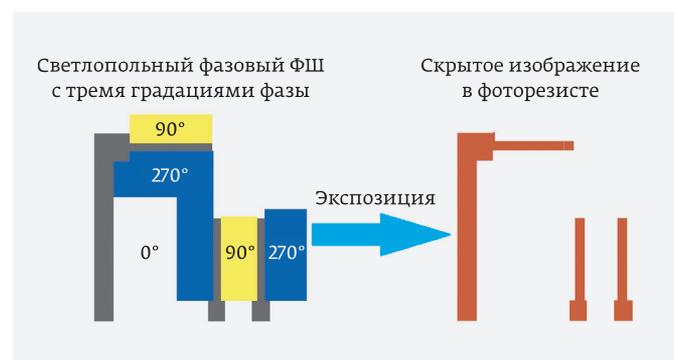


Рис. 11. Формирование затворных структур при помощи фазового ФШ с тремя градациями фазы

даже при использовании проекционных литографических установок с длиной волны рабочего излучения 248 нм [6].

К сожалению, кроме упомянутого явления фазовых конфликтов, приводящего к необходимости использования двойной экспозиции, с неизбежным значительным увеличением затрачиваемого на нее времени, фотошаблоны с чередованием фазы имеют ряд других весьма серьезных недостатков. Так, например:

1. инспекция и восстановление дефектов, возникающих на фазосдвигающих участках, крайне нетехнологичны, поэтому производство бездефектных фотошаблонов с чередованием фазы сложно и дорого;
2. контроль фазы на фазосдвигающих участках затруднен;
3. рассеяние света на границах фазосдвигающих областей приводит к деградации изображения;
4. по причине неизбежного разброса глубины травления фазосдвигающих участков возникает дисбаланс интенсивностей.

Таким образом, можно констатировать, что использование ФШ с чередованием фазы целесообразно на «прорывных» направлениях при разработке новых технологических процессов или для решения узкоспециализированных задач. Кроме того, их использование оправдано при проведении наиболее «критических» литографий, например, при формировании затворных слоев. В большинстве существующих на сегодняшний день коммерческих технологий, использующих фазосдвигающие ФШ, доля таких шаблонов крайне невелика (единицы процентов).

ОСЛАБЛЯЮЩИЕ ФАЗОСДВИГАЮЩИЕ ФШ (EAPSM)

Использование ослабляющих фазосдвигающих ФШ подтвердило свою эффективность как для 248-нм,

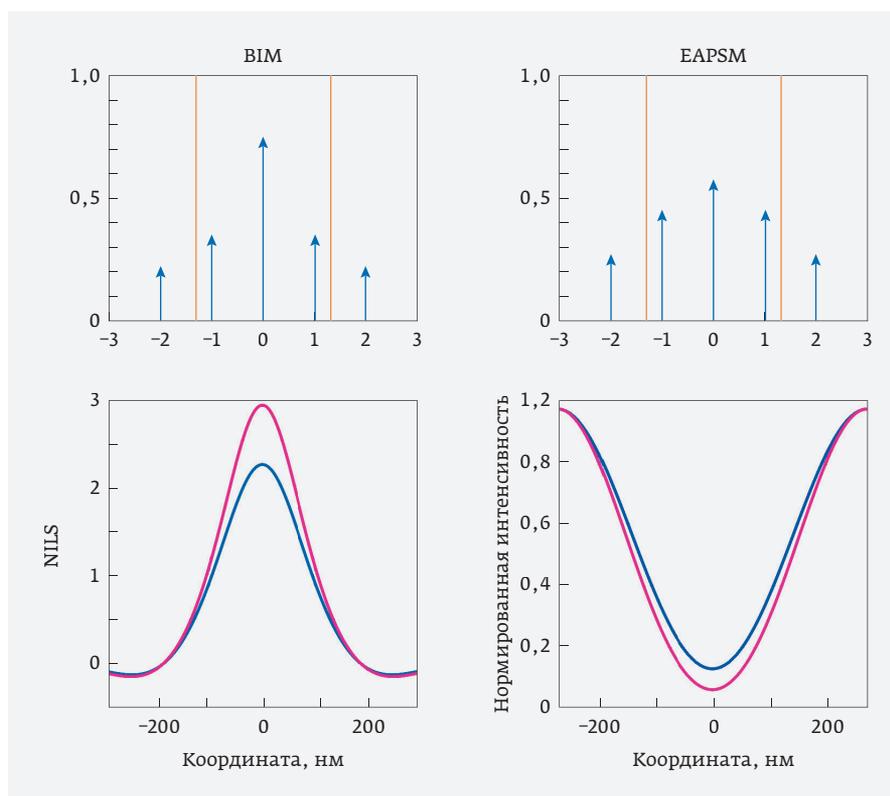


Рис. 12. Сравнение интенсивности дифракционных порядков, зависимости NLS от величины дефокуса и профиля нормированной интенсивности воздушного изображения для случая бинарного ФШ и ослабляющего фазосдвигающего ФШ с вращением фазы 180° и пропусканием 6% (групповая линейчатая структура с шириной линии 180 нм и периодом 540 нм, длина волны 248 нм, $NA=0,6$, осевое некогерентное освещение, $\sigma=0,75$)

так и для 193-нм литографии. Такие ФШ имеют наилучшее соотношение цена/эффективность, обладают высокой технологичностью, хорошими показателями по однородности критических размеров. Ослабляющие фазосдвигающие фотошаблоны являются наиболее часто используемыми в подавляющем большинстве коммерческих технологий, как в FEOL-, так и в BEOL-процессах. Это обусловлено, в том числе отсутствием фазовых конфликтов, а, следовательно, и необходимости в сложных операциях по разбиению слоев на составляющие. При переходе к более продвинутым уровням технологии дизайн, разработанный для бинарных ФШ, в большинстве случаев простейшим образом переносится на ослабляющие фазовые ФШ, при этом требуется лишь перекалибровка модели OPC.

Ослабляющие фазосдвигающие фотошаблоны увеличивают глубину фокуса и максимальный разброс по дозе экспозиции посредством перераспределения энергетических характеристик порядков в картине

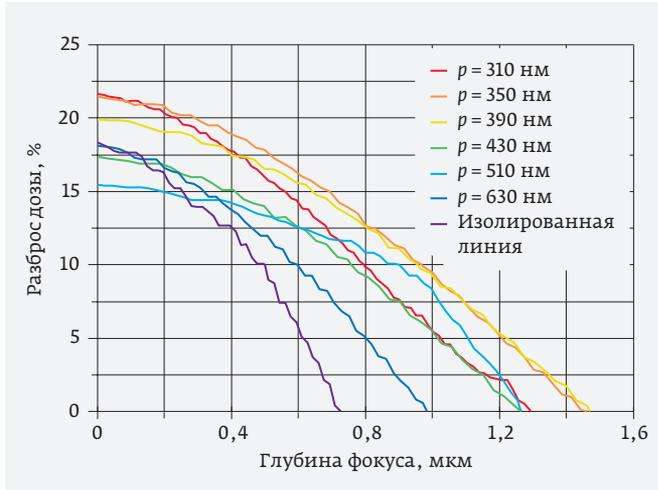


Рис. 13. Результаты модельного эксперимента по расчету процессного окна (одиночная и периодические линейные структуры, ширина линии 130 нм, длина волны 248 нм, $NA=0,7$, осветитель Quasar, $\sigma_{in}=0,5$, $\sigma_{out}=0,8$, угол 30° , ослабляющий фазосдвигающий ФШ с вращением фазы 180° и пропусканием 6%)

дифракции, создаваемой периодическими структурами изображения. Моделирование и эксперименты показывают, что процессное окно является оптимальным в случае, когда 0-й и 1-е порядки дифракции имеют близкие значения амплитуды [7].

На рис. 12 схематически изображена дифракционная картина, даваемая групповыми темными структурами на ослабляющем фазосдвигающем шаблоне в сравнении с бинарным шаблоном. Видно, что нулевой порядок имеет меньшую интенсивность в сравнении с бинарным шаблоном, а 1-е и 2-е – большую. На том же рисунке показаны соответствующие распределения интенсивности на пластине. Видно, что NLS (а, следовательно, и допуск на разброс экспозиции) существенно возрастает.

Кроме того, увеличение интенсивности высших порядков дифракции приводит к расширению процессного окна. На рис. 13 показаны результаты модельного эксперимента по расчету процессного окна для разных значений периода групповых темных линий шириной 130 нм, формируемых ослабляющим фазосдвигающим ФШ, а также для изолированной линии той же ширины. При допустимом разбросе экспозиции в 10% глубина фокуса для каждого периода и для изолированной линии составила более 0,5 мкм.

На рис. 14 приведено общее процессное окно для всех указанных структур при тех же параметрах осветителя в случаях ослабляющего фазосдвигающего

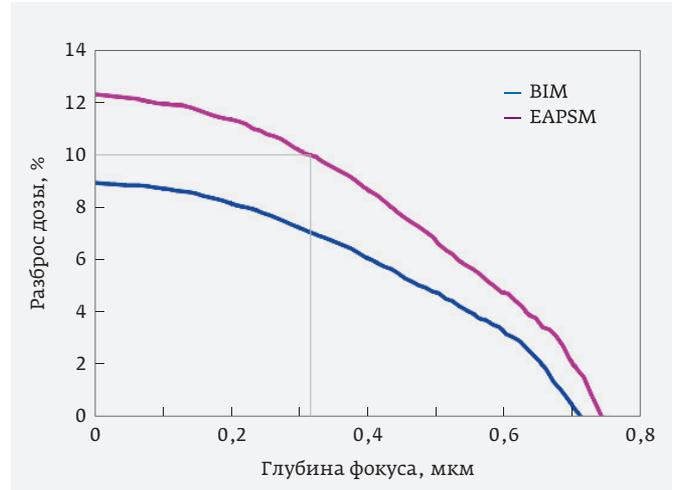


Рис. 14. Общее процессное окно для структур из рис. 13 в сравнении с общим процессным окном в случае бинарного ФШ

и бинарного фотошаблонов. Налицо выигрыш по глубине фокуса, получаемый при использовании фазосдвигающего ФШ.

Рис. 15 иллюстрирует выбор оптимального коэффициента пропускания темного элемента ослабляющего фазосдвигающего ФШ, содержащего изолированные линейчатые структуры шириной 90 нм, а также линейчатые структуры той же ширины

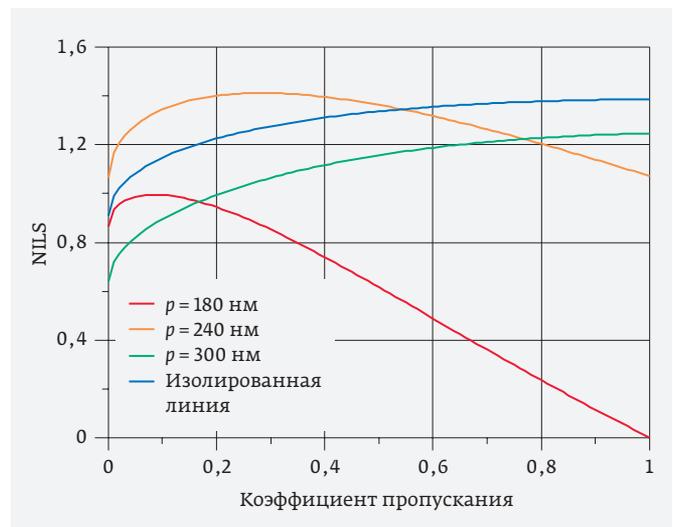


Рис. 15. Зависимость NLS от коэффициента пропускания темного элемента ослабляющего фазосдвигающего ФШ для периодических линейных структур разного периода (ширина линии 90 нм, длина волны экспонирующего излучения 193 нм, $NA=0,85$, осветитель Quasar, $\sigma_{in}=0,66$, $\sigma_{out}=0,96$, угол 30°)

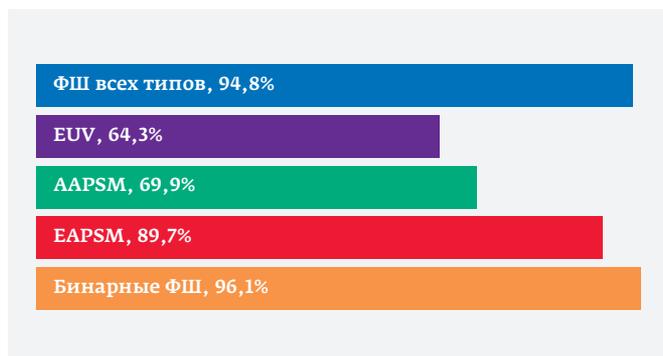


Рис. 16. Усредненный по производителям выход годных для фотошаблонов, изготовленных в 2017 году [9]

с периодами 180, 240 и 300 нм. Видно, что оптимальный коэффициент пропускания, дающий максимальный NILS для каждой из структур, составляет около 14%. Так как выбор коэффициента пропускания, как правило, невелик, становится целесообразной подгонка правил проектирования ИС под имеющиеся варианты фазовых ФШ, поставляемые маскшопами.

Наряду с очевидными достоинствами ослабляющие фазовые ФШ имеют и некоторые недостатки. Так, например, возможен эффект возникновения боковых лепестков излучения в области расположения темных элементов, так как амплитуда в них больше нуля. Это накладывает некоторые ограничения на дозу экспонирования. Кроме того, возможны ошибки совмещения слоев из-за прозрачности шаблона (крайне редко). Перечисленные недостатки являются не критичными и не идут ни в какое сравнение с проблемами, возникающими при необходимости использования фотошаблонов с чередующейся фазой.

РЫНОК ФАЗОСДВИГАЮЩИХ ФОТОШАБЛОНОВ

Фазосдвигающие фотошаблоны (в особенности, ФШ с чередованием фазы) являются дорогостоящими прецизионными изделиями, изготовление которых достаточно трудоемко. На рис. 16 сравнивается усредненный по производителям выход годных для фотошаблонов разного типа, выпущенных в 2017 году (по данным консорциума E-Beam [9]).

Видно, что выход годных для ФШ с чередованием фазы (AltPSM) сравним с выходом годных для шаблонов, предназначенных для работы в экстремальном ультрафиолетовом излучении. Эти данные свидетельствуют о том, насколько сложны в изготовлении фазосдвигающие ФШ с чередованием фазы.

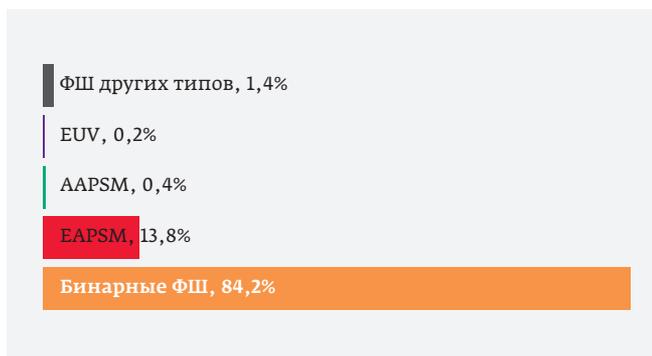


Рис. 17. Распределение фотошаблонов, изготовленных в 2017 году по типам [9]

Тут имеет смысл отметить, что использование в литографии вакуумного ультрафиолета (или экстремального ультрафиолета, EUV или ЭУФ) – достаточно новое и чрезвычайно сложное направление в развитии полупроводниковой технологии. Для этого излучения ($\lambda=13,5$ нм) прозрачных материалов не существует, поэтому все элементы оптических систем подобных установок (включая фотошаблоны) могут быть только отражающими и должны находиться в вакууме. «Шероховатость» поверхности таких элементов не должна превышать $0,2$ нм (3σ)! При этих условиях отражающая способность зеркала составляет величину 65–66% для длины волны 13,5 нм [10]. Кроме того, материал подложки должен иметь нулевой коэффициент термического расширения в диапазоне рабочих температур [11]. Изготовление оптических элементов и фотошаблонов такого уровня крайне трудоемко и затратно.

Рис. 17 показывает распределение всех выпущенных в 2017 году ФШ по типам (данные консорциума E-Beam [7]). Учитывались основные мировые производители фотошаблонов: AMTC, DNP, GlobalFoundries, Intel, PDMC, Photronics, Samsung, SMIC, TMC и Torrapan.

Рис. 16 и 17 свидетельствуют о том, что шаблоны с чередованием фазы (AltPSM, AAPSM) используются в коммерческих технологиях крайне редко по причине их дороговизны и низкой технологичности. Напротив, ослабляющие фазосдвигающие шаблоны (AttPSM, EAPSM) составили почти 14% от всех произведенных в 2017 году. С учетом того, что подсчет велся по всем существующим уровням технологии, это очень существенная доля.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гудмен Д.** Введение в фурье-оптику. – М.: Мир, 1970.
2. **Levenson M. D., Viswanathan N. S., Simpson R. A.** Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask: 12 // IEEE Transactions on Electron Devices. 1982. V. 29. № 12. P. 1828–1836.
3. **Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В.** Общая теория технологии и микроэлектроника: Часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2018. № 3 (171). С. 63–93.
4. **Шелепин Н.А.** Особенности суб-100 нанометровых технологий СБИС. // В кн.: Международная конференция «Микроэлектроника 2015» Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение. Сборник докладов, Алушта 2016. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. С. 22–30.
5. **Levinson H. J.** Principles of Lithography. 3rd-rd ed. SPIE Press, 2010.
6. **Mack C. A.** Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.
7. **Eynon B.G., Wu B.** Photomask Fabrication Technology; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 2005.
8. Calibre® PSMgate™ User's Manual, v2017.2 49. Mentor Graphics Corporation, 2017.
9. <https://www.ebeam.org>.
10. **Quesnel E. et al.** Study of ion-beam-sputtered Mo/Si mirrors for EUV lithography mask: influence of sputtering gas // Proceedings of SPIE: Advances in Optical Thin Films 88/2004. V. 5250. P. 88–98.
11. **Kawata M. et al.** Novel low thermal expansion material for EUV application // Proceedings of SPIE: Emerging Lithographic Technologies X/2006. V. 61511A. P. 61511A1–7.

Технология изготовления транзисторов с обеднением и обогащением канала на нитриде галлия

► А. Ю. Павлов
ИСВЧПЭ РАН

На основе «цифрового» травления разработан способ бездефектного низкоэнергетичного травления нитридных слоев за счет использования индуктивно-связанной плазмы. Данный способ позволяет уменьшать толщину барьерного слоя гетероструктуры, обеспечивая приближения затвора транзистора к двумерному электронному газу. Интеграция такого травления в технологический цикл изготовления монолитных интегральных схем на нитриде галлия позволяет на одном кристалле формировать транзисторы, работающие в режиме обогащения и обеднения канала.

Technology of Manufacturing Transistors with Depletion and Enhancement of a Channel on Gallium Nitride

A. Yu. Pavlov
IUHFSE RAS

A method of defect-free low-energy etching of nitride layers through the use of inductively coupled plasma has been developed based on digital etching. This method allows to reduce the thickness of the barrier layer of the heterostructure, ensuring that the gate of the transistor approaches the two-dimensional electron gas. The integration of such etching into the technological cycle of manufacturing monolithic integrated circuits on gallium nitride allows one to form transistors operating in the depletion and enhancement mode of a channel on a single chip.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование «цифровой экономики» возможно при наличии «цифровых» технологических процессов, обеспечивающих быстрый переход от изготовления одних изделий к другим с минимальной затратой времени, то есть с повышением производительности труда.

Одной из перспективных задач сверхвысокочастотной (СВЧ) полупроводниковой электроники является освоение нового материала – нитрида галлия, имеющего высокие предельные характеристики: большую удельную плотность тока; высокие напряжения питания; широкий диапазон рабочей температуры окружающей среды и др. [1].

Для создания в одном технологическом процессе как аналоговых, так и цифровых интегральных схем на одном кристалле, необходимо сформировать транзисторы с обеднением канала и с обогащением канала, которые являются взаимодополняющими при схемотехническом проектировании устройств с повышенной степенью интеграции.

В технологическом плане процесс формирования транзисторов может быть как непрерывным во

времени и прекращающимся через определенное время, так и дискретным во времени и повторяющимся через определенные интервалы с заданной длительностью, то есть дискретно, что и позволяет провести то или иное количество технологических циклов, и данный подход в литературе называется «цифровым».

Различие в количестве технологических циклов дает возможность на одной пластине создавать транзисторы как с обеднением канала, так и с обогащением канала с минимальными временными затратами и высокой воспроизводимостью параметров, то есть процентом выхода годных. Изготовление такой пластины с реализацией транзисторов, работающих в режиме обеднения и обогащения, осуществлено в Институте СВЧ полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова РАН.

Одновременно, такой «цифровой» подход, обеспечивает автоматизацию технологического процесса для промышленного изготовления монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ-диапазона и быструю смену выпускаемых на технологической линии изделий

в зависимости от минимальной длины затвора и толщины барьера гетероструктуры [2].

Реализация на одной пластине транзисторов, работающих в режимах обогащения и обеднения, возможно несколькими способами. Сообщалось об успешном опыте имплантации фтора (F^-) в подзатворную область полевого транзистора на нитриде галлия, позволяющего за счет высокой электроотрицательности создавать область, обедненную основными носителями заряда в подзатворной области [3, 4]. Но при использовании фторной имплантации имеются свои минусы, особенно при работе с нитридными структурами, имеющими тонкие барьерные слои (менее 25–30 нм). Наиболее эффективный и надежный способ обеднения канала нитридной структуры, это приближение затвора полевого транзистора к нему за счет подзатворного заглабления травлением [5–11]. Это обеспечивает гибкость маршрута изготовления современных СВЧ МИС. Схематическое изображение полевого транзистора на нитриде галлия с подзатворным заглаблением показано на рис. 1. Рассмотрим метод травления барьерного слоя, обеспечивающий контролируемое уменьшение толщины с минимальным дефектообразованием, позволяющий реализовать на одном кристалле транзисторы с обеднением и обогащением канала. Метод получил в иностранной литературе название «цифровое» травление [7–10].

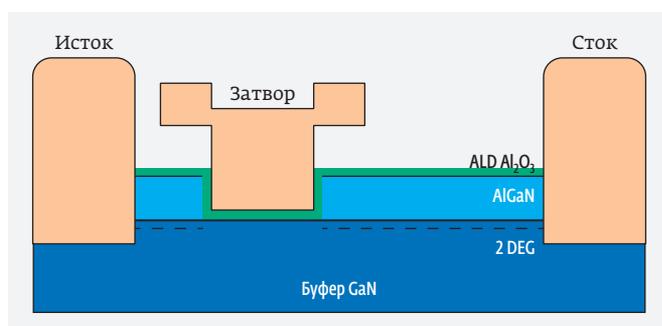


Рис. 1. Схематическое изображение транзистора с подзатворным заглаблением

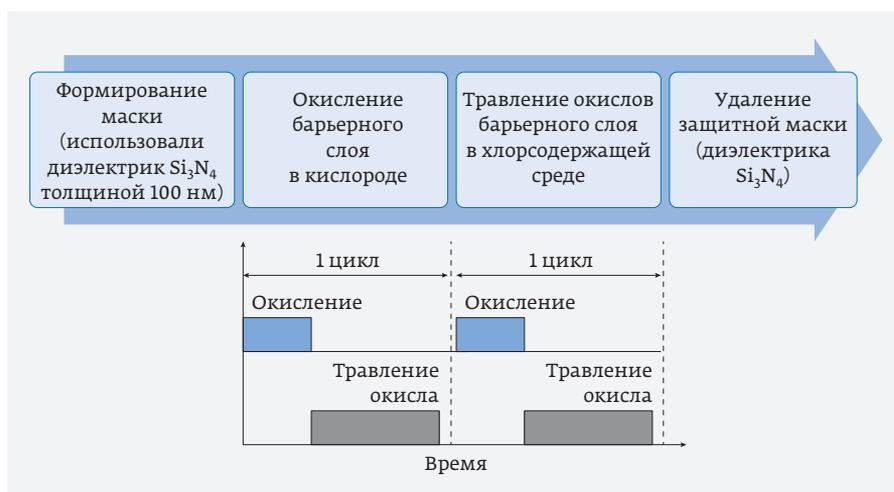


Рис. 2. Блок-схема этапа формирования подзатворного заглабления и циклограмма процесса окисления-травления

«ЦИФРОВОЕ» ТРАВЛЕНИЕ БАРЬЕРНОГО СЛОЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ALGAN

«Цифровое» травление подразумевает двухстадийный процесс травления, окисление полупроводника и снятие его окисла. Процесс является контролируемым, так как за один цикл такого травления снимается конкретная толщина полупроводника. Для гетероструктуры AlGaIn/GaN для окисления используется кислородная среда, а для снятия окисленного барьерного слоя AlGaIn хлорсодержащая среда. Такое последовательное удаление окисленных слоев обеспечивает заглабление со скоростью 1,5–2,5 нм за цикл. На рис. 2 представлена блок-схема реализации такого процесса и его циклограмма.

Идея метода двухстадийного плазмохимического травления для GaN-транзисторов, работающих в режиме обогащения, запатентована лабораторией Hrl (США) и подробно описана в работе [7]. В этой же работе показано сравнение нормально закрытых транзисторов, изготовленных с подзатворным заглаблением «цифровым» травлением, с транзисторами, изготовленными с имплантацией фтора в подзатворную область. Для одних и тех же конструкций гетероструктур транзисторы, изготовленные с использованием «цифрового» травления, имели крутизну (g_m) порядка 250 мСм/мм, что на 67% больше, чем для транзисторов, изготовленных с имплантацией фтором. Пороговое изменение напряжения для транзисторов с «цифровым» травлением в два раза больше, чем для транзисторов с имплантацией фтора. А напряжение пробоя для транзисторов с таким рецессом оказалось более 1000 В.

Для осуществления процесса «цифрового» травления AlGaN формируется жесткая маска из диэлектрической пленки, через которую осуществляется окисление и последующее снятие окисленного слоя AlGaN. После выполнения необходимого количества циклов, снимается пленка диэлектрика, осаждается тонкая пленка пассивирующего диэлектрика и формируется затвор транзистора. Для окисления и травления окислов использовалась установка с источником высокочастотной (ВЧ) мощности, реализующая метод реактивного ионного травления. При проведении процессов использовалась плазма с малыми ВЧ-мощностями, что оказалось эффективно при удалении окислов. Замена химически активного хлора на трихлорид бора позволила улучшить селективность при удалении окисла. Воспроизводимость процесса подтверждается линейной зависимостью высоты формируемой ступеньки от количества проведенных циклов «цифрового травления», которая представлена на рис. 3. А за счет использования одного реактора для окисления и травления возможна частичная автоматизация такого процесса. Но из-за использования режимов реактивного ионного травления в плазме все равно присутствуют высокоэнергетичные ионы, которые приводят к образованию радиационных дефектов и частичному травлению за счет физической составляющей самого барьера AlGaN при удалении окисла. О чем свидетельствует зависимость высоты ступеньки от времени травления в трихлориде бора. При увеличении времени растет высота ступеньки в AlGaN, что свидетельствует о травлении не только окислов, но и самого AlGaN.

Из-за возникновения радиационных дефектов при травлении барьерных слоев и его окислов в последних работах по «цифровому» травлению AlGaN начали отказываться от «сухих» методов и окислы удаляют жидкостным химическим травлением в растворах

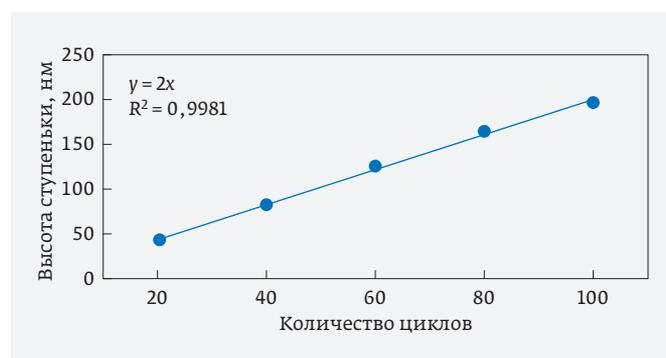


Рис. 3. Зависимость высоты вытравливаемой ступеньки от количества циклов

соляной кислоты [8, 9]. Но использование жидкостных методов снятия окислов при «цифровом» травлении из-за маленькой скорости (около 0,5 нм за цикл) позволяет работать только с тонкими барьерными слоями. Сам технологический процесс при этом является весьма трудоемким из-за необходимости использования нескольких установок для проведения одного цикла травления. Так, для удаления 10 нм барьера может потребоваться до 6 ч при условии, что цикл окисления и жидкостного снятия окисла занимает от 20 мин.

Для реализации «цифрового» травления «сухим» способом в Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова РАН было разработано бездефектное низкоэнергетичное травление барьерного слоя AlGaN, позволяющее снимать окисленный слой без образования радиационных дефектов [10, 11]. С использованием предложенного способа были получены транзисторы на гетероструктуре AlGaN/GaN со смещенным положением рабочей точки по затвору вплоть до транзисторов, работающих в режиме обогащения (E-mode). То есть предложенная технология позволяет реализовать транзисторы, работающие в режиме обеднения (D-mode HEMT) и транзисторы, работающие в режиме обогащения (E-mode HEMT) в одном технологическом цикле изготовления микросхемы.

БЕЗДЕФЕКТНОЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОЕ ТРАВЛЕНИЕ БАРЬЕРНОГО СЛОЯ ALGAN

Для реализации «цифрового» травления использовалась установка Sentech SI-500 ICP с источником индуктивно-связанной плазмы (ИСП). Упрощенная схема установки с источником ИСП представлена на рис. 4. Одно из главных преимуществ использования ИСП – это травление низкоэнергетичными ионами большой плотности. Распределение ионов по энергии для газа носителя CF_4 приведено на рис. 4, где видно, что размытие ионов по энергии слабое, зависимость предоставлена фирмой – изготовителем установки SENTECH Instruments GmbH (Germany, Berlin). При этом использовался один реактор для операций окисления и химического травления окисленного слоя, что позволило автоматизировать процесс за счет использования программного обеспечения установки. Использование источника ИСП позволяет получить плазму с высокой плотностью и малыми энергиями заряженных частиц, взаимодействующими с поверхностью образца, что позволяет избежать возникновения радиационных дефектов в приповерхностных слоях гетероструктуры [12]. Помимо этого, большая концентрация заряженных

частиц в реакторе во время плазмохимических процессов обеспечивает высокую скорость и качество травления. В процессах окисления и травления оксидного слоя источник ИСП использовался совместно с ВЧ-электродом, что обеспечило режим реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме (РИТ-ИСП), позволяющий менять и контролировать напряжение смещения на ВЧ-электроде.

Образец, подвергаемый плазмохимической обработке, располагался на ВЧ-электроде, напряжение смещения на котором определяло энергию заряженных частиц, взаимодействующих с образцом. Предыдущие исследования показали, что для минимизации дефектообразования при проведении процессов травления диэлектриков и полупроводников напряжение смещения на ВЧ-электроде не должно превышать 40 В [12]. Однако, как отмечается в работе [13], снятие оксидной пленки с поверхности нитридной гетероструктуры перед формированием омических контактов с использованием РИТ-ИСП при напряжении смещения на ВЧ-электроде менее 20 В, по-видимому, не позволяет полностью удалить образованную в процессе плазмохимической обработки поверхности GaN ионами из плазмы BCl_3 «паразитную» пленку V_xCl_y , что, в свою очередь, препятствует полному удалению с поверхности гетероструктуры оксидного слоя. Согласно этому, травление оксидной пленки проводилось при смещениях на ВЧ-электроде в диапазоне от 20 до 40 В. При мощности ИСП источника – 100 Вт, мощность ВЧ-генератора – 10 Вт при давлении BCl_3 в камере порядка 1 Па и потоке газа 10 sccm напряжение смещения на ВЧ-электроде составляло

25 В. Использование малого смещения, плазмы высокой плотности и менее химически активного трихлорида бора обеспечило бездефектное селективное удаление оксидной пленки [14]. Селективность была подтверждена отсутствием следов травления AlGaN при длительном воздействии РИТ-ИСП через диэлектрическую маску. Удаление окисленного барьерного слоя за один цикл окисления и снятия оксида обеспечило скорость 1,5 нм за цикл. Представленная технология травления барьерного слоя была использована при изготовлении AlGaN/AlN/GaN HEMT, работающих в режиме обогащения и обеднения [11, 15].

При изготовлении нормально закрытого транзистора на гетероструктуре AlGaN/GaN для защиты активных областей гетероструктуры и сформированных омических контактов от плазмохимического травления, перед окислением барьерного слоя формируется жесткая маска, переносом рисунка через электронный резист на диэлектрик. То есть пластина со сформированными омическими контактами покрывается тонким слоем диэлектрика (100 нм Si_3N_4), затем на нее наносится электронный резист ПММА 950К А4 один слой. Сушится резист при температуре 180 °С 1,5 мин. Потом проводится экспонирование резиста в местах, где будет формироваться подзатворное заглибление («реcess»). После проявления резиста получается рисунок, представляющий собой узкие полоски. Через резистивную маску осуществляется травление диэлектрика до полного его удаления в местах будущего плазмохимического заглибления в барьерный слой. Снятие остатков резиста производилось с помощью кислородной плазмы

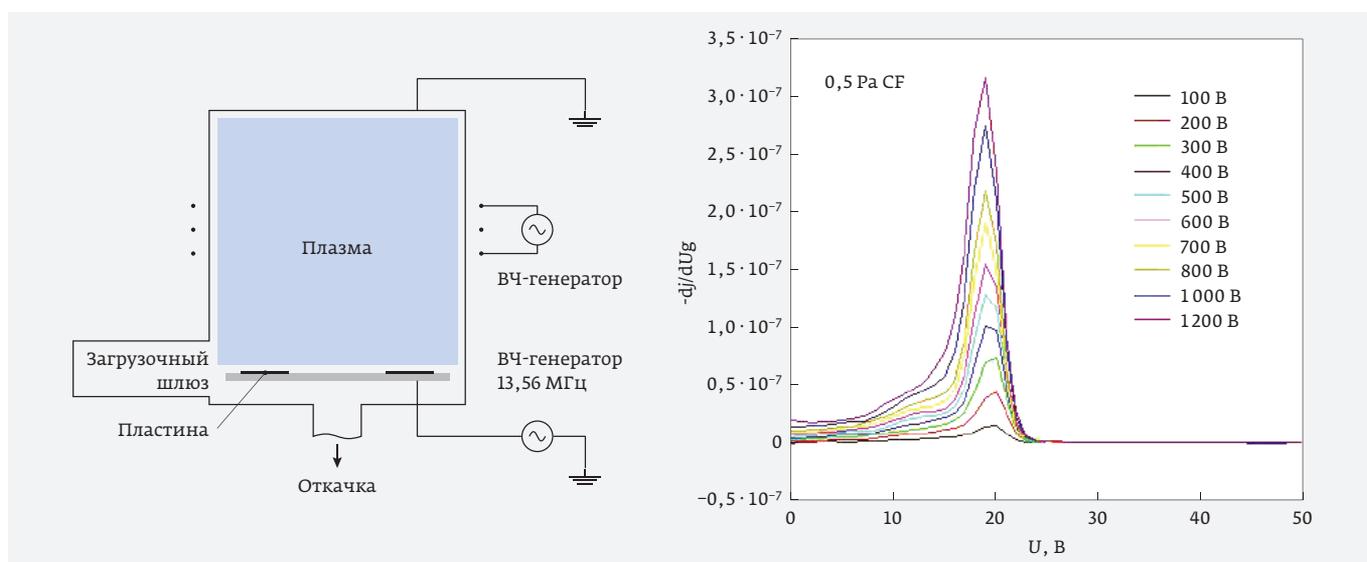


Рис. 4. Упрощенная схема установки с индуктивно-связанной плазмой и распределение ионов по энергии

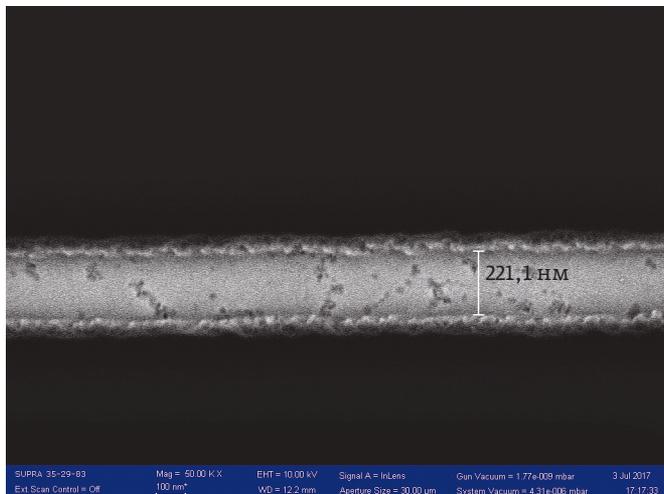


Рис. 5. Сформированная щель в диэлектрике для «цифрового» травления

и отмывкой пластины в ацетоне с последующей промывкой водой. Сформированный рисунок в диэлектрике, используемый в качестве маски для «цифрового» травления, представлен на рис. 5.

После изготовления диэлектрической маски на пластине в установке Sentech SI-500 ICP осуществляется «цифровое» травление барьерного слоя на необходимую глубину по вышеописанной методике циклического окисления и снятия окисла в хлорной среде. Проведя необходимое количество циклов травления, диэлектрическая маска снимается в жидком растворе буферного травителя ($\text{HF} : \text{NH}_4\text{F} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 3 : 7$).

ФОРМИРОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРОВ С ОБЕДНЕНИЕМ И ОБОГАЩЕНИЕМ КАНАЛА НА ОДНОМ КРИСТАЛЛЕ

С использованием разработанного процесса бездефектного низкоэнергетичного травления барьерного слоя AlGaN были изготовлены тестовые транзисторы с подзатворным заглублением на разную глубину и транзисторы без подзатворного заглубления на одной пластине в рамках одного кристалла. Топология и геометрия затвора для всех тестовых транзисторов использовались одинаковые. Конструкция используемой гетероструктуры и топология тестовых транзисторов представлены на рис. 6.

Предложенный процесс бездефектного низкоэнергетичного травления барьерного слоя AlGaN интегрируется в технологический цикл изготовления полевых транзисторов на нитриде галлия непосредственно перед формированием затворной металлизации, обеспечивающей образование барьера Шоттки для управления двумерным электронным газом

гетероструктуры. Поэтому нами были выполнены необходимые технологические операции для создания полевого транзистора до стадии формирования барьера Шоттки. То есть на пластине с гетероструктурой AlGaN/AlN/GaN были сформированы приборная изоляция, обеспечивающая электрический разрыв между макетами тестовых полевых транзисторов, и омические контакты к нитридной гетероструктуре по несплавной технологии [1]. Схематически показано на рис. 7.

После формирования омических контактов пластина покрывалась тонким слоем диэлектрика, в нашем случае мы использовали нитрид кремния (Si_3N_4) толщиной 100 нм.

На осажденном нитриде кремния создается рисунок в местах заглубления в барьерный слой AlGaN через электронный резист плазмохимическим травлением во фторсодержащей среде до слоя AlGaN. После снятия электронного резиста проводилось два цикла бездефектного низкоэнергетичного травления барьерного слоя AlGaN по описанному выше маршруту. Схематически показано на рис. 8.

Затем повторили аналогичную процедуру для соседнего будущего транзистора. Закрыли всю пластину электронным резистом и вскрыли в резисте места, где необходимо удалить диэлектрик для соседнего транзистора в модуле. После плазмохимического травления нитридом кремния удалили электронный резист и через сформированную маску, с открытыми местами для подзатворного заглубления, провели еще три цикла бездефектного низкоэнергетичного травления барьерного слоя AlGaN по описанному выше маршруту. Таким образом, в первом транзисторе самое большое заглубление в барьерный слой AlGaN, соответствующее пяти циклам травления (порядка 7,5-8 нм), во втором транзисторе заглубление в барьерный слой AlGaN, соответствующее трем циклам травления (порядка 4,5-5 нм). Третий транзистор остался



Рис. 6. Конструкция гетероструктуры и топология тестового транзистора

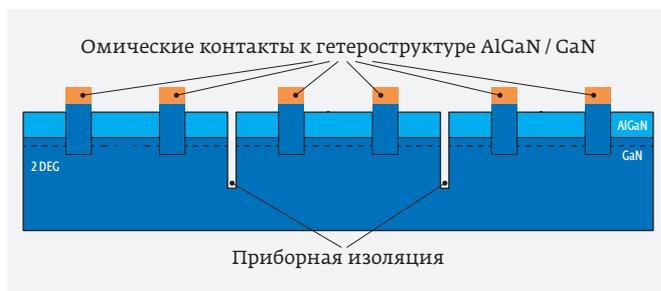


Рис. 7. Схематическое изображение кристалла после этапов формирования приборной изоляции и омических контактов

с барьерным слоем, не подвергшимся «цифровому» травлению, так как был защищен тонким слоем диэлектрика в процессе подзатворного заглабления соседних транзисторов. Схематически все три будущих транзистора показаны на рис. 9. После проведения всех циклов травления тонкий защитный диэлектрик (Si_3N_4) смывался в буферном травителе, очищая поверхность барьерного слоя. На чистую поверхность пластины с омическими контактами и подзатворными заглаблениями осаждался методом атомно-слоевого осаждения тонкий пассивирующий слой Al_2O_3 . Электронно-лучевой литографией формируется профиль грибообразного затвора в системе электрон-

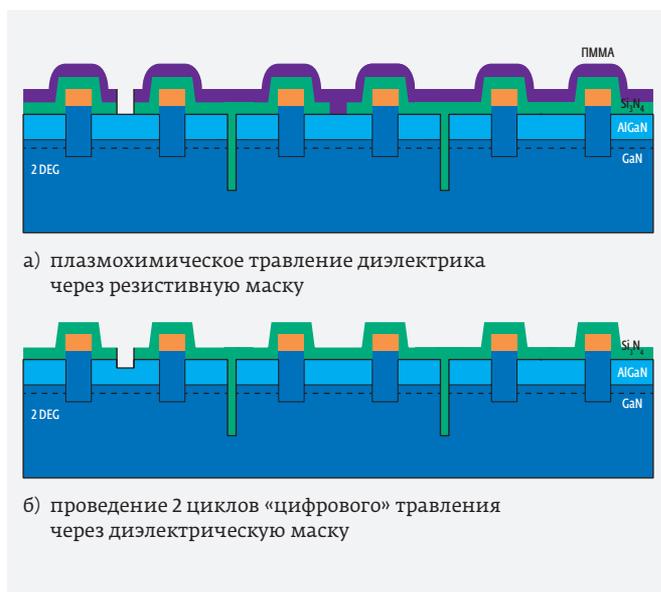


Рис. 8. Схематическое изображение кристалла после формирования подзатворного заглабления в одном макете тестового полевого транзистора: а – травление щели в диэлектрике, б – «цифровое» травление барьерного слоя

ных резистов. После допроявки резиста в кислородной плазме осаждается система металлов, обеспечивающая выпрямляющий контакт, в нашем случае мы осаждали Ni/Au на установке вакуумного нанесения металлов термическим методом.

После удаления лишнего металла с пластины заканчивается цикл формирования полевых транзисторов на нитриде галлия. С полученных транзисторов можно снимать статические и динамические характеристики. На рис. 10 схематически показаны полученные полевые транзисторы на нитриде галлия, которые за счет заглабления обеспечивают обеднение канала. Таким образом, описаны и схематически показаны возможная реализация в одном кристалле транзисторов с обогащением и обеднением канала, обеднение которого достигается за счет приближения затвора к каналу.

С полученных макетов трех типов транзисторов были сняты статические и динамические характеристики. Были изготовлены двухзатворные транзисторы с шириной затвора 50 мкм. На транзисторе без заглабления получилась длина затвора 0,18 мкм на транзисторах с заглаблением, в силу технологических особенностей изготовления, составила порядка 0,22 мкм. Зависимости токов насыщения и крутизны транзисторов от напряжения на затворе представлены на рис. 11. Ключевые их параметры сведены в общую сводную табл. 1.

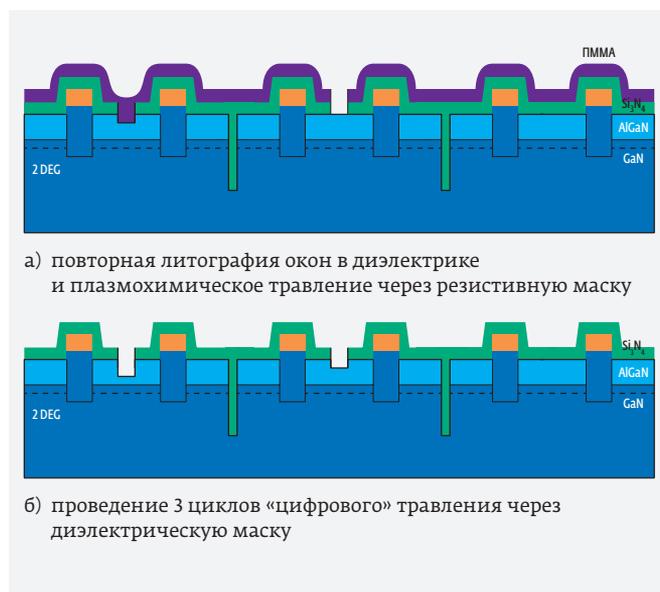


Рис. 9. Схематическое изображение кристалла после формирования подзатворного заглабления в двух соседних макетах тестовых полевых транзисторах: а – травление щели в диэлектрике, б – «цифровое» травление барьерного слоя

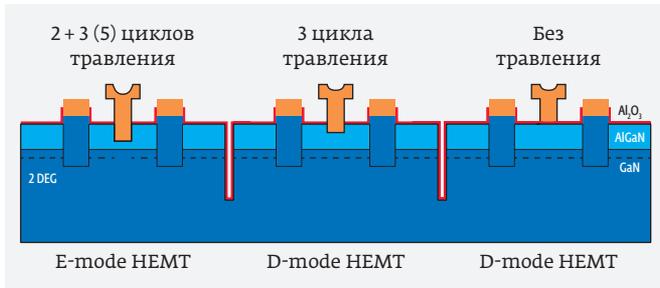


Рис. 10. Схематическое изображение кристалла после формирования полевых транзисторов трех типов: с 5-ю циклами, 3-мя циклами «цифрового» травления и без травления

Как можно видеть из рис. 11, значения токов насыщения не зависят от количества циклов травления, что подтверждает отсутствие образования дефектов в ходе травления барьерного слоя. Значения крутизны также остаются на уровне 320 мСм/мм, при этом максимум смещается в сторону положительных напряжений на затворе при увеличении количества циклов травления.

Для транзисторов без заглабления максимальные частоты усиления по току и однонаправленного коэффициента усиления составили $f_T=57$ ГГц и $f_{MAX}=125$ ГГц, для транзисторов с тремя циклами травления - $f_T=44$ ГГц и $f_{MAX}=102$ ГГц, для тран-

Таблица 1. Параметры полевых транзисторов, изготовленных с разным количеством циклов «цифрового» травления

Количество циклов травления	0	3	5
Максимальная крутизна, мСм/мм	310	320	330
Напряжение на затворе, В	-2,6	-0,2	+1
Напряжение отсечки, В	-6	-2,8	0
Длина затвора, нм	180	220	220
Частота f_T , ГГц	57	44	46
Частота f_{MAX} , ГГц	125	102	104
Усиление G_{MAX} (10 ГГц), дБ	13,1	12,6	13,3

зисторов с пятью циклами травления - $f_T=46$ ГГц и $f_{MAX}=104$ ГГц. Значения максимальных частот для транзисторов без заглабления оказались выше, поскольку длина затворов получилась меньше рассчитанного, была порядка 0,18 мкм, в то время как для транзисторов с подзатворным заглаблением она, в силу технологических особенностей изготовления, была 0,22 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интегрирование процесса бездефектного низкоэнергетического травления барьерного слоя AlGaIn в технологический цикл изготовления микросхем на нитриде галлия позволяет реализовать на одном кристалле как транзисторы с обеднением канала, так и транзисторы с обогащением канала. Предложенный процесс травления обеспечивает приближение затвора полевого транзистора к каналу, обеспечивающее смещение рабочей точки по затвору в сторону положительных напряжений (вплоть до транзисторов, работающих в режиме обогащения). С использованием низкоэнергетического травления барьерного слоя AlGaIn были изготовлены и исследованы макеты с разным значением заглабления и без заглабления в одном тестовом модуле. Использование данного травления позволило улучшить характеристики транзисто-

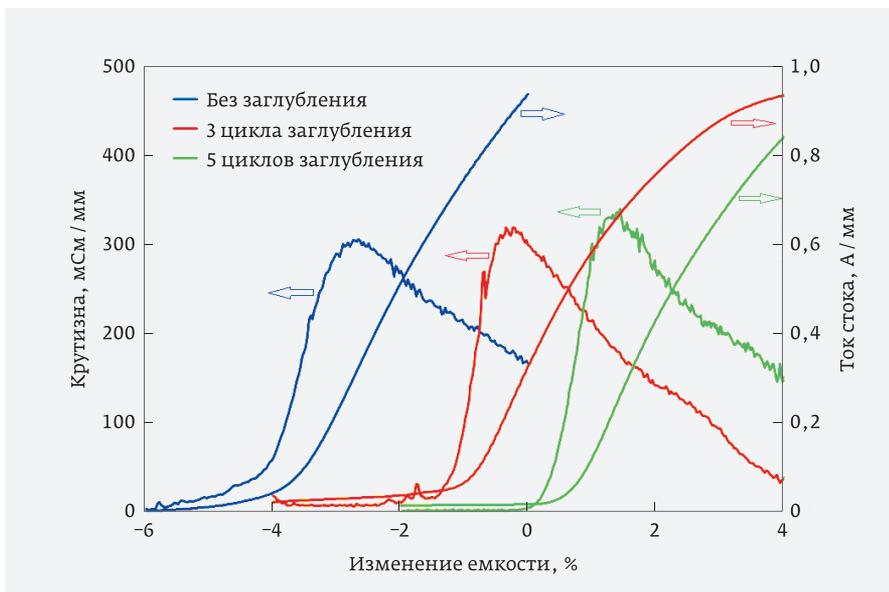


Рис. 11. Зависимости удельной крутизны и удельного тока стока от напряжения на затворе изготовленных полевых транзисторов с 5-ю циклами, 3-мя циклами «цифрового» травления и без травления при напряжении между стоком и истоком 5 В

ров с обеднением канала и изготовить транзисторы с обогащением канала, позволяя в одном кристалле реализовывать микросхемы, построенные на разных типах транзисторов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-01426 А.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров Ю.В., Бугаев А.С., Павлов А.Ю., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Павлов В.Ю., Слаповский Д.Н., Томош К.Н., Енюшкина Е.Н., Галиев Р.Р., Майтама М.В., Зуев А.В., Крапухин Д.В., Гамкрелидзе С.А. Технология изготовления и разработка монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия // Нано- и микро-системная техника. 2017. Т. 19. № 5. С. 273-293.
2. Федоров Ю.В., Михайлович С.В. Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные // Нано- и микро-системная техника. 2016. Т. 18. № 4. С. 217-227.
3. Liu C., Yang S., Liu S., Tang Z., Wang H., Jiang Q., Chen K.J. Thermally stable enhancement mode GaN metal-insulator-semiconductor high-electron-mobility transistor with partially recessed fluorine-implanted barrier // IEEE Electron Device Lett. 2015. V. 36. № 4. P. 318-320.
4. Chen K.J., Kwan A.M.H., Jiang Q. Technology for III-N heterogeneous mixed-signal electronics // Physica Status Solidi A. 2014. V. 211 № 4. P. 769-774.
5. Saito W., Takada Y., Kuraguchi M., Tsuda K., and Omura I. Recessed-gate structure approach toward normally off high-voltage AlGaIn/GaN HEMT for power electronics applications // IEEE Transactions on Electron Devices. 2006. V. 53. № 2. P. 356-362.
6. Lin J.-H., Huang S.-J., Lai C.-H., and Su Y.-K. Normally-off AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistor on Si(111) by recessed gate and fluorine plasma treatment // Japanese Journal of Applied Physics. 2016. V. 55. № 1S. P. 01AD05.
7. Burnham S. D., Boutros K., Hashimoto P., Butler C., Wong D.W.S., Hu M., and Micovic M. Gate-recessed normally-off GaN-on-Si HEMT using a new O₂-BCl₃ digital etching technique // Physica Status Solidi C. 2010. V. 7. № 7-8. P. 2010-2012.
8. Yamanaka R., Kanazawa T., Yagyu E., and Miyamoto Y. Normally-off AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistor using digital etching technique // Japanese Journal of Applied Physics. 2015. V. 54. № 6. P. 06FG04.
9. Chakroun A., Jaouad A., Bouchilaoun M., Arenas O., Soltani A., and Maher H. Normally-off AlGaIn/GaN MOS-HEMT using ultra-thin Al_{0.45}Ga_{0.55}N barrier layer // Physica Status Solidi A. 2017. V. 214. № 11. P. 1600836.
10. Михайлович С.В., Павлов А.Ю., Томош К.Н., Федоров Ю.В. Низкоэнергетическое бездефектное сухое травление барьерного слоя HEMT AlGaIn/AlN/GaN // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 10. С. 61-67.
11. Павлов А.Ю., Гамкрелидзе С.А., Томош К.Н., Федоров Ю.В., Павлов В.Ю., Галиев Р.Р., Мальцев П.П. Технология изготовления взаимодополняющих транзисторов на нитриде галлия // Проблемы разработки перспективных микро-нано-электронных систем (МЭС). 2018. № 3. С. 69-74.
12. Томош К.Н., Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Хабибуллин Р.А., Арутюнян С.С., Мальцев П.П. Исследование процессов изготовления HEMT AlGaIn/AlN/GaN с пассивацией Si₃N₄ in situ // ФТП. 2016. Т. 50. № 10. С. 1434-1438.
13. Андрианов Н.А., Кобелев А.А., Смирнов А.С., Барсуков Ю.В., Жуков Ю.М. Влияние обработки поверхности в BCl₃ плазме на формирование омических контактов к структурам AlGaIn/GaN // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 3. С. 413-418.
14. Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Томош К.Н., Клековкин А.В., Федоров Ю.В. Использование низкоэнергетического процесса травления AlGaIn при формировании подзатворного заглупления полевого транзистора на AlGaIn/GaN гетероструктуре // Мокеровские чтения. 9-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электронике. 2018. С. 54-55.
15. Павлов А.Ю., Галиев Р.Р., Томош К.Н., Павлов В.Ю., Зуев А.В., Федоров Ю.В. «Цифровое» травление барьерного слоя гетероструктуры AlGaIn/GaN // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18. № 2. С. 482-485.

Исследование методов повышения сбоеустойчивости аппаратных реализаций сверточных нейронных сетей

► Р. А. Соловьев, И. А. Харитонов, Д. В. Тельпухов
ИППМ РАН

Статья посвящена исследованию методов борьбы с ошибками, возникающими в процессе работы нейронной сети, реализованной аппаратно в режиме работы с фиксированной точкой. В статье исследовались возможные варианты возникновения ошибок, а также способы их устранения. Для этого использовались сети одной архитектуры на базе модели VGG. Выбранная для проведения экспериментов нейросеть VGG SIMPLE является упрощенной версией (с меньшим числом слоев) широко известных аналогов VGG16 и VGG19. Для устранения влияния сбоев на точность работы сети было предложено использовать метод обучения нейронной сети с добавлением дропаут (dropout), слоев, что позволяет устранить лишнюю зависимость персептронов для соседних слоев. Также исследовался метод усложнения архитектуры сети для уменьшения вероятности ошибочной классификации вследствие ошибок в нейронах. По результатам проведенных экспериментов было отмечено, что добавление слоев dropout при одинаковой точности классификации эталонных сетей позволяет сократить влияние ошибок на качество классификации в нейронных сетях, подверженных сбоям.

Research of Methods for Increasing the Fault Tolerance of Hardware Implementations of Convolutional Neural Networks

R. A. Soloviev, I. A. Kharitonov, D. V. Telpukhov

IPPM RAS

The article is devoted to the investigation of methods for dealing with errors that arise during the operation of a neural network implemented in hardware in the fixed-point mode. The article explored possible variants of error occurrence, as well as ways of their elimination. In this study, networks based on the VGG model were used. The neural network chosen for the experiments is a simplified version (with fewer layers) of the well-known VGG16 and VGG19 analogues. To eliminate the influence of failures on the accuracy of the network, it was suggested to use the method of training a neural network with the addition of dropout layers, which allows eliminating the extra dependence of perceptrons for neighboring layers. The method of complicating the network architecture was also investigated to reduce the probability of erroneous classification due to errors in neurons. According to the results of the experiments, it was noted that the addition of dropout layers with the same accuracy of the classification of reference networks, allows reducing the effect of errors on the quality of classification in neural networks.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день сверточные нейронные сети из-за их высокой эффективности широко применяются в микроэлектронных вычислительных устройствах для решения задач, связанных с компьютерным зрением. Аппаратная реализация нейронных сетей [1] накладывает ряд существенных требований в контексте быстродействия, занимаемой площади и надеж-

ности функционирования. В микроэлектронных устройствах, находящихся под воздействием дестабилизирующих факторов (радиационное излучение, воздействие высоких температур и т. п.), возникают сбои и отказы, что может привести к катастрофическим последствиям из-за некорректной работы всего устройства в целом. Для увеличения устойчивости к сбоям применяется большой набор универсаль-

ных методов, таких как кратное резервирование [2], помехоустойчивое кодирование [3], а также другие архитектурные методы на схемотехническом и топологическом уровнях [4]. В отличие от этих универсальных методов, для нейронных сетей можно разработать специфические методы повышения сбоеустойчивости. В данной работе предлагается использовать dropout-слои [5] в процессе обучения нейронной сети, располагая их после всех сверточных и полносвязных слоев. Проведенное исследование показало, что метод является эффективным и может применяться в дополнение к существующим методам повышения сбоеустойчивости.

СТРУКТУРА СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ (СНС)

Сверточные нейронные сети – это тип нейронных сетей, предложенных Яном Лекуном в 1988 году [6], разработанный для задач распознавания изображений и образов на изображении. Архитектура такой сети строится по аналогии с работой зрительной коры головного мозга у человека. Свое название СНС получила благодаря последовательному выполнению операции свертки двумерных матриц. В качестве алгоритма обучения в такой сети используется метод обратного распространения ошибки (back propagation).

Структура СНС многослойная и однонаправленная и обычно состоит из следующих слоев:

1. Input (входные данные) – на него подается исходное изображение.
2. Conv2D (слой двумерной свертки) – применяет операцию свертки к входным данным. Ядро свертки в большинстве случаев имеет размерность 3×3 .
3. MaxPooling2D (слой пуллинга) выполняет операцию по понижающей дискретизации пространственных размеров (ширина и высота). К примеру, из изображения 28×28 на выходе получится изображение 14×14 . Операция в каждом сегменте 2×2 выбирает максимальную величину, не учитывая остальные. В современных сетях иногда обходятся без этого слоя, используя свертки с шагом, равным 2.
4. Dense (полносвязный слой) – слой, в котором каждый нейрон связан со всеми нейронами на предыдущем слое. Требуется большое число вычислений и хранения большого числа весов. Обычно используются на последних слоях нейронной сети в качестве слоя для классификации результата.

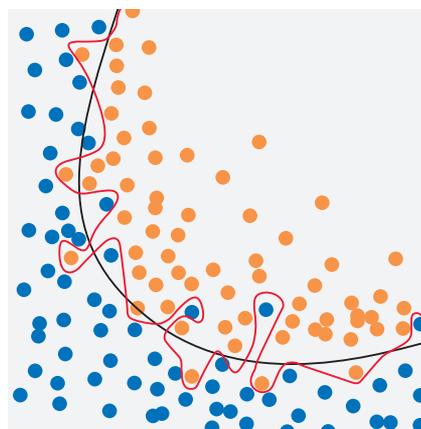


Рис. 1. Демонстрация регуляризованной модели (черная линия) и переобученной модели (красная линия)

5. Activation – слои, добавляющие нелинейность. Наиболее часто используются Relu, Sigmoid, Tanh и их вариации.
6. Дополнительные слои BatchNormalization [7], GlobalAveragePooling и т. д.

СЛОЙ DROPOUT И ЕГО ТРАДИЦИОННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Существует множество параметров при обучении нейронных сетей, таких как порядок подачи входных данных, используемая функция активации, целевые значения выходов нейронов, инициализация весов, коэффициент скорости обучения и т. д. Также перед разработчиками часто возникает ряд проблем, таких как низкая скорость обучения сети, большие накладные расходы на хранение весов, переобучение сети на заданных тестовых данных. Для решения этих проблем применяются разные методы, в частности использование слоев типа dropout. Dropout – это метод регуляризации искусственных нейронных сетей, который в первую очередь предназначен для предотвращения переобучения (overfitting) СНС.

Когда нейронная сеть тренируется на наборе данных, состоящем из небольшого числа элементов, частой проблемой является переобучение. Нейронная сеть во время обучения перестает выделять какие-либо характерные признаки и просто полностью запоминает тренировочную выборку в виде некоторой закономерности. Переобучение – процесс, при котором модель сети делает качественное предсказание только на элементах тренировочной выборки, в то время как при подаче сторонних примеров, не участвовавших в тренировке, результат получается значительно хуже. Пример такой ситуации приведен на рис. 1. Каждый нейрон сети стремится выделять только те признаки, которые помогают решить задачу (предсказать регрессионную модель, классифицировать объект и т. д.). Решить проблему с переобучением позволяет слой

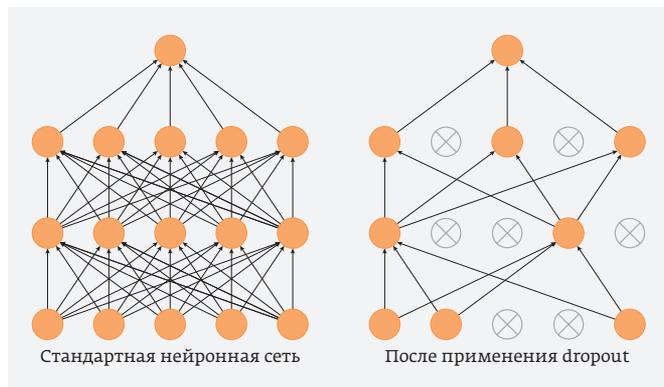


Рис. 2. Графическое представление работы слоя Dropout

dropout, который путем «отсева» случайной части нейронов на каждой итерации обучения позволяет предотвратить сложную совместную адаптацию весов к тренировочным данным (рис. 2) [8].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЛОЯ DROPOUT ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Как было показано в предыдущей главе, dropout позволяет уменьшить зависимость каждого отдельного нейрона на следующем слое от значения нейронов на предыдущем слое. Вследствие этого было выдвинуто предположение о том, что тренированная таким образом нейронная сеть в случае возникновения ошибки в одном из весов с большей вероятностью маскирует ошибку за счет последующих слоев сети.

Dropout обычно применяется только на последних «классификационных» слоях СНС, однако есть возможность использования этих слоев практически после каждого внутреннего слоя, что позволит уменьшить влияние каждого отдельного нейрона промежуточных слоев на общий результат расчетов. Как показывают эксперименты, добавление dropout слоев в середине сети почти не влияет на точность классификации и лишь немного уменьшает скорость обучения.

В исследовании предполагается, что веса нейронной сети хранятся в памяти все время ее функционирования, и именно они, а не результаты промежуточных вычислений, преимущественно подвергаются сбоям и имеют тенденцию к наполнению ошибок. Таким образом, предлагаемый метод применим к задаче обеспечения

устойчивости к инверсиям в ячейках памяти (SEU), в отличие от методов, ориентированных на обеспечение сбоеустойчивости комбинационных схем.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЛОЯ DROPOUT ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В рамках работы были проведены вычислительные эксперименты по внедрению единичных, двукратных и пятикратных ошибок в веса нейронной сети, моделируя тем самым сбои в ячейках памяти. Для тестирования была выбрана сеть VGG Simple [9] на базе архитектуры VGG [10], которая является упрощенным аналогом сетей VGG16 и VGG19. Нейронная сеть VGG Simple была выбрана из соображений простоты и высокой скорости ее обучения, так как она имеет вдвое меньше слоев персептронов и меньшее число фильтров на каждом слое. Для проведения эксперимента было обучено сразу несколько нейронных сетей, построенных на данной архитектуре, они отличались количеством фильтров на каждом из слоев. Структуры обученных сетей представлены далее в схематичном виде на рис. 3. Код для сети на языке Python приведен на рис. 4. Сети были обучены на датасете MNIST для распознавания рукописных цифр [11]. Для обучения использовалась выборка из 50 тыс. изображений. После чего веса сетей сохранялись в качестве эталонных.

После этого тот же набор сетей был модифицирован путем добавления промежуточных слоев dropout. Код для такой сети на языке Python приведен на рис. 5. Эти новые сети обучались повторно на том же наборе данных. По результатам обучения была достигнута высокая точность классификации (порядка 97%) для всех разработанных сетей. Сети с применением dropout имели такую же точность, как и без dropout в рамках погрешности, но требовали несколько большего времени на обучение.

Эксперимент заключался во внедрении ошибок разной кратности в веса нейронной сети, после чего осуществлялась прогонка тестовых изображений. Резуль-

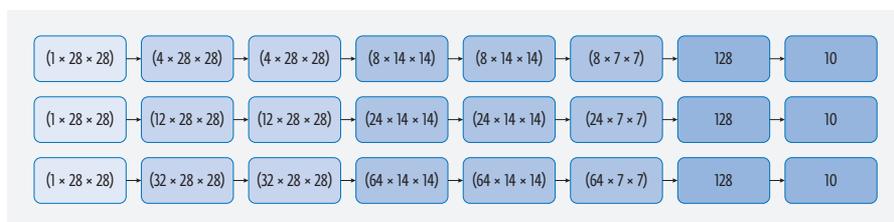


Рис. 3. Схематичное представление обученных сетей семейства VGG SIMPLE

```
def VGG_Simple():
    model = Sequential()
    model.add(Conv2D(4, (3, 3), padding="same", activation="relu", input_shape=input_shape))
    model.add(Conv2D(4, (3, 3), activation="relu", padding="same"))
    model.add(MaxPooling2D(pool_size=(2, 2)))
    model.add(Conv2D(8, (3, 3), padding="same", activation="relu"))
    model.add(Conv2D(8, (3, 3), activation="relu"))
    model.add(MaxPooling2D(pool_size=(2, 2)))
    model.add(Flatten())
    model.add(Dense(128, activation="relu"))
    model.add(Dense(nb_classes, activation="softmax"))
    return model
```

Рис. 4. Код на языке Python (модуль Keras) для описания СНС VGG Simple

таты сравнивались с эталоном, в роли которого выступала та же сеть без ошибок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В экспериментах поочередно брались предварительно обученные нейронные сети. Всего тестировалось 12 СНС. Они отличались размерами сверточных блоков, которые имели размер из списка [4, 12, 32], и значениями dropout: 0 (без dropout), 0,1; 0,25 и 0,5. Ошибка вносилась случайным образом на один из тестируемых в эксперименте слоев сети, после чего через сеть пропускались тестовые данные в количестве 10 тыс. изображений. Результат замеров сравнивался с эталоном в виде СНС без инъекции ошибок.

Далее считался процент числа изображений, для которых результат классификации совпал с эталоном. Это значение в идеальном случае должно быть равно 100%. Значение 100% сигнализирует о том, что внесенные ошибки не повлияли на результат работы ней-

ронной сети. Максимальный размер вносимой в веса ошибки равнялся:

$$\text{error} = 2 \cdot |w_{\max}|.$$

Это значение было выбрано из соображения, что вес в памяти хранится в виде набора битов и при изменении случайных битов, каждый отдельно выбранный вес не может измениться более чем в два раза от максимально возможного веса для заданного слоя.

Результаты внесения однократной ошибки в сверточные слои

Из табл. 1 можно видеть, что результат сети с малым числом нейронов без dropout в результате внесения одиночной ошибки ухудшился до 93% точных ответов. В то же время использование метода dropout с показателем 0,1 выправил этот результат почти до 99%. Из этой же таблицы видно, что нейронные сети, которые

```
def VGG_Simple_drop():
    model = Sequential()
    model.add(Conv2D(4, (3, 3), padding="same", activation="relu", input_shape=input_shape))
    model.add(Dropout(0.25))
    model.add(Conv2D(4, (3, 3), activation="relu", padding="same"))
    model.add(Dropout(0.25))
    model.add(MaxPooling2D(pool_size=(2, 2)))
    model.add(Conv2D(8, (3, 3), padding="same", activation="relu"))
    model.add(Dropout(0.25))
    model.add(Conv2D(8, (3, 3), activation="relu"))
    model.add(Dropout(0.25))
    model.add(MaxPooling2D(pool_size=(2, 2)))
    model.add(Flatten())
    model.add(Dense(128, activation="relu"))
    model.add(Dropout(0.5))
    model.add(Dense(nb_classes, activation="softmax"))
    return model
```

Рис. 5. Код на языке Python для нейронной сети VGG SIMPLE с добавленными блоками dropout после каждого слоя

Таблица 1. Процент совпадения результатов с эталоном в результате внесения однократной ошибки в сверточный слой

	No dropout	Dropout (0.5)	Dropout (0.25)	Dropout (0.1)
CONV_1 (4,3,3)	93,17	93,41	97,66	98,90
CONV_1 (12,3,3)	99,85	99,75	99,80	99,89
CONV_1 (32,3,3)	99,97	99,94	99,94	99,93
CONV_2 (4,3,3)	98,03	98,69	99,08	98,57
CONV_2 (12,3,3)	99,92	99,94	99,94	99,94
CONV_2 (32,3,3)	99,99	99,99	99,99	99,99
CONV_3 (8,3,3)	95,60	97,74	98,38	98,88
CONV_3 (24,3,3)	99,91	99,92	99,89	99,90
CONV_3 (64,3,3)	99,98	99,98	99,98	99,97
CONV_4 (8,3,3)	96,62	99,71	99,62	99,54
CONV_4 (24,3,3)	99,85	99,95	99,93	99,88
CONV_4 (64,3,3)	99,98	99,99	99,99	99,97

имеют большее число нейронов, почти не реагируют на единичную ошибку в слоях.

Результаты внесения двукратной ошибки в сверточные слои

Двукратный сбой сильнее влияет на конечный результат работы сетей (см. табл. 2). Так, если сбой вносится в третий слой свертки, процент правильных ответов относительно сети без сбоев опускается до 83% в сети с малым числом нейронов. Правильно подобранный показатель dropout позволяет поднять этот результат до 97–98% ответов. В то же время использование метода dropout с показателем 0,1 выправило этот результат.

Результаты внесения пятикратной ошибки в сверточные слои

Пятикратная ошибка является критичной для сети с малым числом нейронов (см. табл. 3). Результат ее не может значительно улучшить и предложенный метод, хотя заметим, что результат с использованием dropout все равно намного лучше. Большие нейронные сети на протяжении всех экспериментов ожидаемо показали лучшую устойчивость к ошибкам.

Результаты внесения ошибок в полносвязные слои

Из табл. 4 видно, что полносвязные слои в целом более устойчивы к ошибкам, чем сверточные слои.

Таблица 2. Процент совпадения результатов с эталоном в результате внесения двукратной ошибки в сверточный слой

	No dropout	Dropout (0.5)	Dropout (0.25)	Dropout (0.1)
CONV_1 (4,3,3)	90,87	88,86	96,29	98,40
CONV_1 (12,3,3)	99,79	99,62	99,74	99,84
CONV_1 (32,3,3)	99,95	99,92	99,90	99,90
CONV_2 (4,3,3)	88,81	92,51	97,24	97,70
CONV_2 (12,3,3)	99,88	99,92	99,89	99,94
CONV_2 (32,3,3)	99,99	99,99	99,97	99,98
CONV_3 (8,3,3)	83,30	88,88	97,81	98,06
CONV_3 (24,3,3)	99,77	99,80	99,84	99,73
CONV_3 (64,3,3)	99,96	99,98	99,95	99,96
CONV_4 (8,3,3)	88,10	98,12	99,35	98,52
CONV_4 (24,3,3)	99,72	99,90	99,90	99,85
CONV_4 (64,3,3)	99,96	99,98	99,96	99,97

Скорее всего, это связано с тем, что каждый нейрон связан с каждым нейроном предыдущего слоя, в отличие от сверточных слоев, где связь лишь с частью нейронов предыдущего слоя. В общем случае нейронов на предыдущем полносвязном слое больше, чем в сверточных слоях, и ошибка в одном или нескольких из них не так сильно влияет на результат следующего слоя из-за большего числа весовых коэффициентов в формуле расчета значения на следующем слое. Тут тоже наблюдается та же тенденция – наличие dropout после полносвязного слоя увеличивает устойчивость нейросети к сбоям.

Таблица 3. Процент совпадения результатов с эталоном в результате внесения пятикратной ошибки в сверточный слой для сети с малым числом фильтров (4–8)

	No dropout	Dropout (0,5)	Dropout (0,25)	Dropout (0,1)
CONV_1 (4,3,3)	88,65	87,57	94,46	96,83
CONV_2 (4,3,3)	60,13	73,24	80,57	76,45
CONV_3 (8,3,3)	57,58	65,55	75,59	60,30
CONV_4 (8,3,3)	41,48	86,07	82,58	62,03

Таблица 4. Процент совпадения результатов с эталоном в результате внесения ошибок в полносвязные слои

	No dropout	Dropout (0,5)	Dropout (0,25)	Dropout (0,1)
Одиночная ошибка				
DENSE_1 (Small)	99,964	99,974	99,985	99,963
DENSE_1 (Medium)	99,976	99,997	99,993	99,990
DENSE_1 (Large)	99,993	99,998	99,997	99,996
DENSE_2 (Small)	99,348	99,955	99,923	99,893
DENSE_2 (Medium)	99,754	99,951	99,944	99,908
DENSE_2 (Large)	99,912	99,971	99,957	99,952
Двукратная ошибка				
DENSE_1 (Small)	99,797	99,930	99,972	99,938
DENSE_1 (Medium)	99,966	99,990	99,985	99,979
DENSE_1 (Large)	99,989	99,997	99,993	99,990
DENSE_2 (Small)	99,030	99,874	99,826	99,669
DENSE_2 (Medium)	99,418	99,898	99,855	99,822
DENSE_2 (Large)	99,759	99,946	99,918	99,875
Пятикратная ошибка				
DENSE_1 (Small)	98,950	99,643	99,690	99,160
DENSE_2 (Small)	96,837	99,527	99,568	99,445

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом по результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- добавление dropout-слоев помогает уменьшать влияние ошибок на результат классификации нейросетей в условиях наличия дестабилизирующих факторов;
- сети с большим числом нейронов более устойчивы к вносимым ошибкам;
- даже относительно небольшие нейронные сети, как рассматриваемые в данной статье, легко переносят многократные ошибки и обычно без существенного падения точности классификации. Можно ожидать, что большие промышленные нейросети (VGG16, VGG19) смогут выдерживать ошибки более высокой кратности;
- полносвязные слои ожидаемо оказались более устойчивы к ошибкам, нежели сверточные из-за большего числа весовых связей между персептронами.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-07-00409.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Матюшкин И. В., Соловьев Р. А.** Модель адаптивного нейрона и его аппаратная реализация на ПЛИС // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2017. № 3. С. 53–61.
2. **Тельпухов Д. В., Рухлов В. С., Иванова Г. А., Рыжова Д. И., Надоленко В. В., Деменева А. И.** Исследование вариантов частичного резервирования при проектировании сбоеустойчивых логических блоков ПЛИС // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1 (48). С. 47.
3. **Гаврилов С. В., Гуров С. И., Жукова Т. Д., Рухлов В. С., Рыжова Д. И., Тельпухов Д. В.** Методы повышения сбоеустойчивости комбинационных ИМС на основе избыточного кодирования // В сб.: ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА труды факультета ВМК МГУ имени М. В. Ломоносова. – М., 2016. С. 93–102.
4. **Адамов Д. Ю., Адамов Ю. Ф., Балака Е. С.** Анализ устойчивости КМОП дифференциальных усилителей к воздействию накопленной дозы ионизирующих излучений // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2016. Т. 21. № 2. С. 145–151.
5. **Hinton G. E., Srivastava N., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. R.** Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors // arXiv preprint arXiv:1207.0580–2012.
6. **LeCun Y., Boser B., Denker J. S., Henderson D., Howard R. E., Hubbard W. and Jackel L. D.** Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition, Neural Computation, 1(4):541–551, Winter 1989.
7. **Ioffe S. & Szegedy C.** Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. arXiv preprint arXiv:1502.03167. 2015.
8. **Wan L., Zeiler M., Zhang S., Le Cun Y. & Fergus R.** Regularization of neural networks using dropconnect. In International Conference on Machine Learning (PP. 1058–1066). 2013.
9. **Соловьев Р. А., Кустов А. Г., Рухлов В. С., Щелочков А. Н., Пузырьков Д. В.** Аппаратная реализация сверточной нейронной сети в ПЛИС на базе вычислений с фиксированной точкой // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 7 (192). С. 186–197.
10. **Simonyan K., Zisserman A.** Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // arXiv preprint arXiv:1409.1556. 2014.
11. **LeCun Y., Bottou L., Bengio Y. and Haffner P.** Gradient-based learning applied to document recognition. Proceedings of the IEEE, 86(11):2278–2324, November 1998.

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА ДЛЯ «ТОЧЕЧНОЙ» МОДЕЛИ ФОТОНА

Недавно в ряде публикаций нами был рассмотрен ряд феноменов, связанных с проблемами квантовой нелокальности. Было показано, что эти загадочные явления могут быть единообразно объяснены, если принять во внимание парадокс часов при распространении квантовых частиц. Действительно, известно, что для движущихся фотонов время как бы останавливается, а пройденное расстояние обращается в ноль. Более того, опираясь на волновые свойства материи, аналогичные представления удалось развить и для квантовых частиц, движущихся с досветовой скоростью. Как нами было установлено, некорректное понимание квантовой нелокальности основано на придании абсолютного характера наблюдению, выполняемому в лабораторной системе отсчета. Основываясь на относительности меры нелокальности в разных системах отсчета, мы в ходе нашего анализа использовали мысленную систему отсчета, связанную с упрощенной моделью фотона, в которой игнорируется наличие спина и факт аксиальной симметрии при движении фотона. Такая модель вызывает настороженную реакцию у некоторых специалистов, категорически отрицающих наличие системы отсчета, в которой фотон мог бы рассматриваться как покоящийся. В данной публикации нами проанализирована оригинальная работа Эйнштейна 1905 года и показано, что использование упрощенной системы отсчета для фотона не должно приводить к неверным физическим результатам, позволяя при этом эффективно объяснить различные аспекты квантовой нелокальности.

Ключевые слова: специальная теория относительности, квантовая механика, квантовая нелокальность, квантовая запутанность, коллапс волновой функции

Сведения об авторах:

Белинский Александр Витальевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Земли физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»; Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2; e-mail: belinsky@inbox.ru;

Шульман Михаил Хананович, Институт исследований природы времени, 119234, Москва, Ленинские горы, 1–12, МГУ имени М. В. Ломоносова, Биологический факультет, кафедра общей экологии, e-mail: shulman@dol.ru.

КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ФИЗИЧЕСКОМ ЛЕГИРОВАНИИ НАНОКОМПОЗИТОВ НАНОСТРУКТУРАМИ С БОЛЬШИМ СРОДСТВОМ К ЭЛЕКТРОНАМ

Обсуждаются основные задачи России в сфере высоких технологий. Предлагаются теоретическая разработка и верификация экспериментами методов создания и исследования свойств физически легированных материалов с пространственно-неоднородной структурой на микро- и нанометровом масштабе. Приводятся результаты исследований квантово-размерных эффектов при физическом легировании нанокomпозитов наноструктурами с большим сродством к электронам. Теория сравнивается с имеющимися экспериментами. На верифицированной теории и экспериментах разработаны наноструктурированные материалы, в том числе с повышенной прочностью и износостойкостью, неоднородные на нанометровом уровне, физически легированные наноструктурами – квантовыми ловушками для свободных электронов. Решение этих задач позволяет создавать новые наноструктурированные материалы, исследовать их различные физические параметры, конструировать, изготавливать и эксплуатировать устройства с новыми техническими и функциональными возможностями, в том числе и для атомной промышленности. Управление нанокристаллической структурой и свойствами композитных многофазных материалов и покрытий может осуществляться путем изменения в них концентрации наноструктур свободного углерода. Установлено, что присутствие наноструктур углерода в композите значительно улучшает ударную вязкость, микротвердость, люминесцентные характеристики, температуростойкость и расширяет диапазон возможных применений таких композитов по сравнению с чистыми материалами, такими как медь, алюминий, карбиды переходных металлов, люминофоры, полупроводники (термоэлектрики).

Ключевые слова: нанокomпозит на основе карбидов переходных металлов, управление свойствами нанокomпозитов, коэффициент сухого трения, износостойкость, температуростойкость нанокomпозитов, метод физического легирования нанокomпозитов

Сведения об авторах:

Висикайло Филип Иванович, доктор физико-математических наук, Акционерное общество «Московский радиотехнический институт РАН», 117519, Россия, Москва, Варшавское шоссе, д. 132, e-mail: filvys@yandex.ru;

Митин Валерий Семёнович, кандидат технических наук, Открытое акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А. А. Бочвара», 123098, Москва, ул. Розова, д. 5а, e-mail: mitin2@mail.ru;

Якушкин Алексей Александрович, Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», 142190, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, e-mail: yakushkin.aa@gmail.com.

МИКРОСИСТЕМЫ ДЛЯ БОРТОВОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Современные космические аппараты уже повсеместно используют системы искусственного интеллекта (ИИ) из-за реализации принципа автономного функционирования и связанного с ними ситуационного управления внешними ситуациями, а также для решения вопросов разработки адаптивной и интеллигентной полезной нагрузки. Наземные системы контроля и управления также нуждаются в интегрировании систем ИИ для осуществления соответствующих обменных взаимодействий с интеллектуализированными бортами. В работе рассмотрена проблематика микросистем ИИ для создания интеллектуальных бортовых систем с применением технологии систем в корпусе.

Ключевые слова: системы искусственного интеллекта, интеллигентные бортовые системы, микросистемы ИИ

ON THE USE OF THE REFERENCE SYSTEM FOR THE «POINT» MODEL OF A PHOTON

We recently considered a number of phenomena about quantum non-locality. We showed that these «mysterious» phenomena can be explained by the same manner if one applied the clock paradox to quantum particles propagation. Really, a duration of a moving photon travel and its travel distance become zero. The more, the wave properties of a massive particle predict the close issue. As we revealed, the incorrect understanding of quantum non-locality is based on the operation with the absolute laboratory reference frame. Contrary, we consider a relative non-locality measure in the different reference frames that is associated with the simplified model of «pointed» where we ignored the spin existing and its motion axial symmetry photon. Such model initiated some rejections due to existing impossibility of any reference frame where a photon can be considered as immobile. In this paper we analyze the original Einstein work (1905) that did not account results of the quantum electrodynamics, and photon localization problems. Finally, we show that the simplified pointed photon model does not lead the incorrect physical issues.

Keywords: special theory of relativity, quantum mechanics, quantum nonlocality, quantum entanglement, wave function collapse

Data of authors:

Belinsky Alexander Vitalievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Physics of the Earth, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, 1, building 2, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991; e-mail: belinsky@inbox.ru. Shulman Mihael Hananovich, Institute for Time Nature Explorations, Lomonosov Moscow State University, 1, building 2, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991, e-mail: shulman@dol.ru

QUANTUM-DIMENSIONAL EFFECTS IN PHYSICAL ALLOYING NANOCOMPOSITES BY NANOSTRUCTURES WITH A GREAT AFFINITY FOR ELECTRONS

We are discussing the main tasks of Russia in the field of high technologies. We propose theoretical development and verification by experiments of methods for creating and studying the properties of physically doped materials with a spatially inhomogeneous structure on a micro and nanometer scale. The results of studies of quantum-size effects in the physical doping of nanocomposites with nanostructures with high electron affinity are presented. The theory is compared with existing experiments. On the verified theory and experiments, nanostructured materials were developed, including those with increased strength and wear resistance, non-uniform at the nano-level, physically doped with nanostructures – quantum traps for free electrons. Solving these problems allows you to create new nanostructured materials, explore their various physical parameters, design, manufacture and operate devices with new technical and functional capabilities, including those for the nuclear industry. The nanocrystalline structure and properties of composite multiphase materials and coatings can be controlled by varying the concentration of free carbon nanostructures in them. It is established that the presence of carbon nanostructures in the composite significantly improves the impact strength, microhardness, luminescence characteristics, temperature resistance and expands the range of possible applications of such composites compared to pure materials such as copper, aluminum, transition metal carbides, phosphors, semiconductor (thermoelectric).

Keywords: nanocomposite based on transition metal carbides, management of nanocomposite properties, coefficient of dry friction, wear resistance, temperature resistance of nanocomposites, method of physical alloying of nanocomposites

Data of authors:

Vysikaylo Philip Ivanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, the Moscow Radiotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 117519, Russia, Moscow, Warsaw highway, 132, e-mail: filvys@yandex.ru;

Mitin Valeriy Semyonovich, Candidate of Engineering Sciences, the A. A. Bochvar High-Technology Scientific Research Institute for Inorganic Materials, 123098, Russia, Moscow, Rogov street, 5a, e-mail: mitin2@mail.ru;

Yakushkin Alexey Aleksandrovich, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, 12, st. Pushkovykh, vladenie, Troitsk, Moscow Region, 142190, e-mail: yakushkin.aa@gmail.ru.

MICROSYSTEMS FOR ON-BOARD ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The artificial intelligence (AI) systems are widely used on the board today because of the necessity to provide autonomous satellite functioning and closely connected with it freelance flight situations control and also in order to design more adaptive and intelligent payload subsystems. The ground control infrastructures also need AI implementation to communicate correspondently with such satellites. The microsystems for on-board applications issues in the context of systems in package are discussed in the present article.

Keywords: The artificial intelligence (AI) systems, intelligent on-board applications, microsystems of the artificial intelligence

Сведения об авторах:

Данилин Николай Семенович, доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «Российские космические системы», 111250, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 53, e-mail: n_daniilin@rambler.ru;

Димитров Димитр Миланов, доктор технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Космос Комплект», 125466, г. Москва, ул. Соколово-Мещерская д. 14, офис 9, e-mail: ilias@coscom.ru

Сабиров Ильяс Харресович, Общество с ограниченной ответственностью «Космос Комплект», 125466, г. Москва, ул. Соколово-Мещерская д. 14, офис 9, e-mail: ilias@coscom.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ КМОП КНИ, РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В работе продемонстрирована возможность рефлектометрического метода для исследования параметров n-MOP-транзистора. Проведены измерения параметров n-MOP-транзистора в динамическом режиме (входная и проходная емкости, выходная проводимость, крутизна транзистора). Измерены и рассчитаны динамические характеристики транзистора, такие как максимальная частота усиления по току и время задержки.

Ключевые слова: n-MOP, рефлектометрия, ГГц

Сведения об авторах:

Тимошенко Валерий Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (МИЭТ); 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.; e-mail: valerio4@hotmail.com;

Хлыбов Александр Иванович, кандидат технических наук; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (МИЭТ); 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.; e-mail: alex1818@yandex.ru;

Родонов Денис Владимирович, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (МИЭТ); 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.; e-mail: denis.rodionov@gmail.com;

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

Сеletzкий Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1, e-mail: aseletskey@niime.ru.

ГЕНЕРАЦИЯ RULE-BASED SRAF ДЛЯ ДВУМЕРНЫХ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР С УЧЕТОМ ПРАВИЛ MRC: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Как известно, одним из средств RET (Resolution enhancement technology) в фотолитографии является расстановка в топологии печатаемых вспомогательных структур (SRAF) для уменьшения разницы в пропечатке плотно расположенных и изолированных линий. Для технологии 90 нм наиболее актуальна расстановка SRAF на основе правил (RBSRAF). В статье описываются проблемы, связанные с расстановкой RBSRAF для двумерных топологий с манхэттенской геометрией, и приводится пример их решения, учитывающий ограничения, накладываемые правилами проектирования фотомаски.

Ключевые слова: фотолитография, RET, Rule-based SRAF, MRC-friendly design, 90 нм

Сведения об авторах:

Шамин Евгений Сергеевич, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Московский физико-технический институт, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9, e-mail: eshamin@niime.ru;

Ипатова Евгения Васильевна, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр.1, e-mail: eipatova@niime.ru;

Кузовков Алексей Валерьевич, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр.1, e-mail: akuzovkov@niime.ru;

Иванов Владимир Викторович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр.1, e-mail: vlivanov@niime.ru;

Балан Никита Николаевич, кандидат технических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр.1, e-mail: nbalan@niime.ru.

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Микроэлектроника относится к числу приоритетных отраслей промышленности и является важнейшим направлением научно-технического прогресса во всех развитых странах. Все экономически развитые страны уверенно встали на путь тотальной компьютеризации и информатизации своих обществ. Способность разрабатывать и производить высокотехнологичные изделия микроэлектроники уже сегодня в значительной мере определяет уровень общественного развития этих стран в целом, и в будущем эта тенденция будет только усиливаться.

Выработка общих принципов организации технологического процесса и разработка оптимальной, технологически реализуемой и относительно дешевой СБИС с субмикронными размерами невозможны без единого комплексного подхода, включающего в себя рассмотрение всей совокупности проблем. При этом необходимо

Data of authors:

Daniilin Nikolay Semenovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Joint Stock Company «Russian Space Systems», 53, Aviamotornaya, Moscow, Russia, 111250, e-mail: n_daniilin@rambler.ru;

Dimitrov Dimitr Milanov, Doctor of Technical Sciences Limited liability company «Cosmos Complect» Ltd., Sokolovo-Mescherskaya, 14, office 9, Moscow, 125466, e-mail: ilias@coscom.ru;

Sabirov Ilias Harresovich, Limited liability company «Cosmos Complect» Ltd., 14, office 9, Moscow, 125466, e-mail: ilias@coscom.ru.

CMOS-SOI TRANSISTOR PARAMETERS RESEARCH USING REFLECTOMETRY METHOD

This paper shows the possibility of reflectometry approach for n-MOSFET transistor parameters research. Transistor parameters measurement was done in dynamic mode (input and transition capacitances, output conductance, transconductance). Transistor dynamic parameters (f_T , delay time) were measured and analytically calculated.

Keywords: n-MOSFET, reflectometry, TDR, GHz

Data of authors:

Timoshenkov Valeri Petrovich, doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Integrated Electronics and Microsystems; National Research University of Electronic Technology (MIET); Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: valerio4@hotmail.com;

Khlybov Alexander Ivanovich, candidate of technical Sciences, researcher of the Department of Integrated Electronics and Microsystems; National Research University of Electronic Technology (MIET); Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498; e-mail: alex1818@yandex.ru;

Rodionov Denis Vladimirovich, engineer of the Department of Integrated Electronics and Microsystems; National Research University of Electronic Technology (MIET); Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498; E-mail: denis.rodionov@gmail.com;

Shelepin Nikolay Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, deputy director of Molecular Electronic Research Institute, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadnyi Proezd, 12/1, e-mail: nchelepin@niime.ru;

Seletskey Andrey Valerievich, candidate of technical Sciences, head of department at Molecular Electronic Research Institute, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadnyi Proezd, 12/1, e-mail: aseletskey@niime.ru.

RULE-BASED SRAF GENERATION FOR TWO-DIMENSIONAL TOPOLOGICAL STRUCTURES WITH MRC RULES BEING CONSIDERED: PROBLEMS AND SOLUTION

As known, one of the RET (Resolution enhancement technology) tools in photolithography is a placement of Sub-resolution assist features (SRAF). This method helps to reduce the difference in printing of dense and isolated lines. In case of 90 nm technology, Rule-based SRAF placement (RBSRAF) is considered as best solution. This article describes problems, associated with RBSRAF placement for two-dimensional topologies with Manhattan geometry, and provides an example of their solution, which takes the limitations, imposed by the photomask design rules, into account.

Keywords: Photolithography, RET, Rule-based SRAF, MRC-friendly design, 90 nm

Data of authors:

Shamin Evgeniy Sergeevich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12/1, 1st Zapadny proezd, 124460, Moscow institute of physics and technology, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russian Federation, e-mail: eshamin@niime.ru;

Ipatova Evgeniya Vasilyevna, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12/1, 1st Zapadny proezd, 124460, e-mail: eipatova@niime.ru;

Kuzovkov Alexey Valeriyevich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12/1, 1st Zapadny proezd, 124460, e-mail: akuzovkov@niime.ru;

Ivanov Vladimir Viktorovich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12/1, 1st Zapadny proezd, 124460, e-mail: vlivanov@niime.ru;

Balan Nikita Nikolaevich, candidate of technical Sciences, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12/1, 1st Zapadny proezd, 124460, e-mail: nbalan@niime.ru.

THE INDUSTRIAL TECHNOLOGY OF MICROELECTRONICS

The microelectronics is the most important direction of scientific and technical progress in all developed countries among priority industries. All economically developed countries surely followed a way of a total computerization and informatization of the societies. The ability to develop and make hi-tech products of microelectronics already today considerably determines the level of social development of these countries in general, and in the future this tendency will only be amplified.

Development of the general principles of the organization of technological process and development of optimum, technologically realized and rather cheap system-on-chip with submicronic sizes are impossible without the uniform integrated approach including consideration of all set of problems. At the same time it

обеспечить достижение отдельных целей одновременно с максимальным участием в выполнении всех связанных с этим отдельных задач и достижением тем самым главной цели, поставленной перед системой. Для этого необходимы большая подготовительная работа, глубокие знания и понимание составляющих компонентов проблемы, взаимосвязей между этими компонентами, стоимостных отношений, всей проблемы в целом.

Ключевые слова: промышленная технология, высокотехнологичные изделия микроэлектроники, СБИС с субмикронными размерами

Сведения об авторах:

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.

МЕСТО ФАЗОСДВИГАЮЩИХ ФОТОШАБЛОНОВ В СОВРЕМЕННОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Статья посвящена применению фазосдвигающих шаблонов в современной полупроводниковой технологии. Сделан обзор различных видов используемых фазосдвигающих структур. Описаны принципы функционирования основных типов фазовых фотошаблонов, рассмотрены их достоинства и недостатки, а также место в мировом рынке фотошаблонов.

Ключевые слова: фотошаблон, фазовый сдвиг, AAPSM, EAPSM

Сведения об авторах:

Балан Никита Николаевич, кандидат технических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: nbalan@niime.ru;

Иванов Владимир Викторович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: vlaivanov@niime.ru;

Кузовков Алексей Валерьевич, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: akuzovkov@niime.ru;

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

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ С ОБЕДНЕНИЕМ И БОГАЩЕНИЕМ КАНАЛА НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ

На основе «цифрового» травления разработан способ бездефектного низкотемпературного травления нитридных слоев за счет использования индуктивно-связанной плазмы. Данный способ позволяет уменьшать толщину барьерного слоя гетероструктуры, обеспечивая приближения затвора транзистора к двумерному электронному газу. Интеграция такого травления в технологический цикл изготовления монокристаллических интегральных схем на нитриде галлия позволяет на одном кристалле формировать транзисторы, работающие в режиме обогащения и обеднения канала.

Ключевые слова: нитрид галлия, полевой транзистор с высокой подвижностью электронов, обеднение канала, плазмохимическое травление

Сведения об авторах:

Павлов Александр Юрьевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное научное учреждение «Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова» Российской академии наук, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр. 5; e-mail: p.alex.ur@yandex.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ СБООУСТОЙЧИВОСТИ АППАРАТНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ СВЕРТЧОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Статья посвящена исследованию методов борьбы с ошибками, возникающими в процессе работы нейронной сети, реализованной аппаратно в режиме работы с фиксированной точкой. В статье исследовались возможные варианты возникновения ошибок, а также способы их устранения. Для этого использовались сети одной архитектуры на базе модели VGG. Выбранная для проведения экспериментов нейросеть VGG SIMPLE является упрощенной версией (с меньшим числом слоев) широко известных аналогов VGG16 и VGG19. Для устранения влияния сбоя на точность работы сети, было предложено использовать метод обучения нейронной сети с добавлением дропаут (dropout), слоев, что позволяет устранить лишнюю зависимость перцептронов для соседних слоев. Также исследовался метод усложнения архитектуры сети для уменьшения вероятности ошибочной классификации вследствие ошибок в нейронах. По результатам проведенных экспериментов было отмечено, что добавление слоев dropout при одинаковой точности классификации эталонных сетей, позволяет сократить влияние ошибок на качество классификации в нейронных сетях, подверженных сбоям.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, дропаут, сбоеустойчивость

Сведения об авторах:

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

Тельпухов Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, 124365 Москва, Зеленоград, ул. Советская, д. 3, e-mail: nofrost@inbox.ru.

Харитонов Иван Александрович, Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, 124365 Москва, Зеленоград, ул. Советская, д. 3, e-mail: tibboh69@gmail.com.

is necessary to provide the achievement of the separate purposes along with the maximum participation in performance of all separate tasks connected with it and the achievement thus of the main goal of a system. This requires a lot of preparatory work, profound knowledge and understanding of the component parts of a problem, interrelations between these components, the value relations and the whole problem in general.

Keywords: the industrial technology, hi-tech products of microelectronics, system-on-chip with submicron sizes

Data of authors:

Gornev Evgeny Sergeevich, doctor of Engineering Sciences, «Molecular Electronic Research Institute» Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, d. 12 / 1, e-mail: egornev@niime.ru.

PHASE SHIFTING MASKS IN MODERN SEMICONDUCTOR TECHNOLOGY

This article discusses phase-shift masks usage issues in modern semiconductor technology. An overview of different types of phase-shifting patterns has been made. Key principles of various phase-shift mask functioning were described. Advantages and disadvantages of their usage were considered as well as their position on the global photomask market.

Keywords: Photomask, phase shift, AAPSM, EAPSM

Data of authors:

Balan Nikita Nikolaevich, candidate of technical Sciences, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12 / 1, 1st Zapadny proezd, 124460, e-mail: nbalan@niime.ru;

Ivanov Vladimir Victorovich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12 / 1, 1st Zapadny proezd, 124460, e-mail: vlaivanov@niime.ru;

Kuzovkov Alexey Valeryevich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12 / 1, 1st Zapadny proezd, 124460, e-mail: akuzovkov@niime.ru;

Shamin Evgeniy Sergeevich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 12 / 1, 1st Zapadny proezd, 124460, e-mail: eshamin@niime.ru

TECHNOLOGY OF MANUFACTURING TRANSISTORS WITH DEPLETION AND ENHANCEMENT OF A CHANNEL ON GALLIUM NITRIDE

A method of defect-free low-energy etching of nitride layers through the use of inductively coupled plasma has been developed based on digital etching. This method allows to reduce the thickness of the barrier layer of the heterostructure, ensuring that the gate of the transistor approaches the two-dimensional electron gas. The integration of such etching into the technological cycle of manufacturing monolithic integrated circuits on gallium nitride allows one to form transistors operating in the depletion and enhancement mode of a channel on a single chip.

Keywords: gallium nitride, field-effect transistor with high electron mobility, channel depletion, plasma-chemical etching

Data of authors:

Pavlov Aleksandr Yurevich, candidate of technical sciences, Institute of ultra-high frequencies electronics of Russian Academy of Sciences, Nagorniy pr. 7, str.5, Moscow, 117105 Russian Federation; e-mail: p.alex.ur@yandex.ru.

RESEARCH OF METHODS FOR INCREASING THE FAULT TOLERANCE OF HARDWARE IMPLEMENTATIONS OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

The article is devoted to the investigation of methods for dealing with errors that arise during the operation of a neural network implemented in hardware in the fixed-point mode. The article explored possible variants of error occurrence, as well as ways of their elimination. In this study, networks based on the VGG model were used. The neural network chosen for the experiments is a simplified version (with fewer layers) of the well-known VGG16 and VGG19 analogues. To eliminate the influence of failures on the accuracy of the network, it was suggested to use the method of training a neural network with the addition of dropout layers, which allows eliminating the extra dependence of perceptrons for neighboring layers. The method of complicating the network architecture was also investigated to reduce the probability of erroneous classification due to errors in neurons. According to the results of the experiments, it was noted that the addition of Dropout layers with the same accuracy of the classification of reference networks, allows reducing the effect of errors on the quality of classification in neural networks.

Keywords: convolutional neural networks, dropout, fault tolerance

Data of authors:

Soloviev Roman Aleksandrovich, candidate of technical Sciences, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, 3, Sovetskaya str., Zelenograd, Moscow, 124365, e-mail: nofrost@inbox.ru;

Tel'pukhov Dmitriy Vladimirovich, candidate of technical Sciences, head of department at Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, 3, Sovetskaya str., Zelenograd, Moscow, 124365, e-mail: nofrost@inbox.ru;

Kharonov Ivan Aleksandrovich, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, 3, Sovetskaya str., Zelenograd, Moscow, 124365, e-mail: tibboh69@gmail.com.