



# **ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА**

## **СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА**

Научно-технический журнал

Выпуск 4 (168) 2017

---

# **ELECTRONIC ENGINEERING**

## **SERIES 3 MICROELECTRONICS**

Scientific & Technical Journal

Issue 4 (168) 2017

Москва, 2017



**"ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА.  
Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА"****Редакционный совет****Главный редактор**Красников Г.Я., д.т.н.,  
академик РАН**Члены редакционного совета****Аристов В. В.,**

член-корреспондент РАН

**Асеев А. Л., д. ф.-м. н.,**

академик РАН

**Бетелин В. Б., д. ф.-м. н.,**

академик РАН

**Бокарев В. П., к. х. н.,**

ответственный секретарь

**Бугаев А. С., д. ф.-м. н.,**

академик РАН

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

член-корреспондент РАН

**Горнев Е. С., д. т. н.,**

зам. главного редактора

**Грибов Б. Г., д. х. н.,**

член-корреспондент РАН

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

академик РАН

**Стемпковский А. Л., д. т. н.,**

академик РАН

**Чаплыгин Ю. А., д. т. н.,**

академик РАН

**Шелепин Н. А., д. т. н.,**

зам. главного редактора

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

124460 г. Москва, Зеленоград,

1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1

+7 495 229-70-43

journal\_EEM-3@mikron.ru

www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

Журнал издается с 1965 года

**Учредитель**АО "Научно-исследовательский  
институт молекулярной  
электроники"**КОЛОНКА РЕДАКТОРА..... 4****РАЗРАБОТКА И КОНСТРУИРОВАНИЕ****С. В. ГАВРИЛОВ, Д. А. ЖЕЛЕЗНИКОВ, И. А. ЛИПАТОВ,  
И. В. ТИУНОВ**Маршрут проектирования для отечественных  
программируемых интегральных схем специального  
назначения: интеграция с существующими промышленными  
средствами автоматизированного проектирования и решение  
проблем импортозамещения ..... 5–11**ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИЯ****Г. Я. КРАСНИКОВ, Е. С. ГОРНЕВ, П. В. ИГНАТОВ,  
Д. С. МИЗГИНОВ**Конструктивно-технологические методы реализации  
транзисторов, ориентированных на высокое напряжение  
питания ..... 12–15**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ****Г. Я. КРАСНИКОВ, Е. С. ГОРНЕВ, И. В. МАТЮШКИН**Общая теория технологии и микроэлектроника:  
Часть 2. Вопросы метода и классификации ..... 16–41**В. Л. ЕВДОКИМОВ**Молекулярно-кинетическая модель процесса осаждения  
слоев из газовой фазы ..... 42–55**И. А. ЛЫСЕНКО, Д. Д. ЗЫКОВ, Е. В. АНИЩЕНКО,  
Н. Ю. ХАБИБУЛИНА**SILVACO TCAD как инструмент для моделирования  
фотолитографии ..... 56–61**НАДЕЖНОСТЬ****Д. В. ТЕЛЬПУХОВ, В. С. РУХЛОВ, А. Н. СТАШЕВСКИЙ,  
Ю. Ф. АДАМОВ**Исследование метода инжектирования ошибок в задаче  
оценки сбоеустойчивости логических схем в базисе ПЛИС ..... 62–67**АННОТАЦИИ ..... 68**

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

**Editorial Council**

**Chief Editor**

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

**The Members**

**of Editorial Council**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Editorial Staff Address**

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

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal\_EEM-3@mikron.ru

🌐 www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

The journal is published since 1965

**Founder**

"Molecular Electronics Research  
Institute" Stock Company

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

**DEVELOPMENT AND DESIGNING**

**S. V. GAVRILOV, D. A. ZHELEZNIKOV, I. V. TIUNOV, I. A. LIPATOV**  
Design Flow for Domestic Programmable Integrated Circuits for  
Special Purpose: Integration with Existing Computer-Aided Design  
Systems and Solution for Problems of Import Substitution ..... 5–11

**PROCESSES AND TECHNOLOGY**

**G. YA. KRASNIKOV, E. S. GORNEV, P. V. IGNATOV, D. S. MIZGINOV**  
Constructive-Technological Methods for Implementing Transistors  
Aimed at High Supply Voltage ..... 12–15

**MATHEMATICAL SIMULATION**

**G. YA. KRASNIKOV, E. S. GORNEV, I. V. MATYUSHKIN**  
General Theory of Technology and Microelectronics:  
Part 2. Issues of Methodology and Classification ..... 16–41

**V. L. EVDOKIMOV**

Modeling of Kinetics of Chemical Vapor Deposition  
and The Basic Characteristics of The Layers ..... 42–55

**I. A. LYSENKO., D. D. ZYKOV, E. V. ANISHCHENKO,**

**N. YU. HABIBULINA**

Silvaco TCAD as a Tool for Photolithography Simulation ..... 56–61

**RELIABILITY**

**D. V. TELPUKHOV, V. S. RUKHLOV, A. N. STASHEVSKII,**

**YU. F. ADAMOV**

The Research Method of Injecting Errors in The Problem  
of Assessing The Failure Tolerance of The Logic Circuits in The Basis  
of FPGA ..... 62–67

**ABSTRACTS** .....68

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

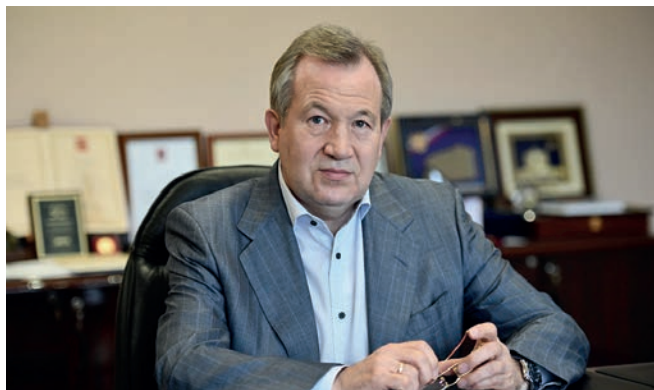
**УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!**

Представляю Вашему вниманию очередной, 13-й выпуск, научно-технического издания «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника». Опубликованные в выпуске работы посвящены как чисто научным, так и технологическим и информационным проблемам развития микроэлектроники, что отражает политематичность журнала и его открытость для авторов, ведущих исследования в различных областях науки.

В данном номере журнала опубликованы результаты научных исследований сотрудников Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук по автоматизированному проектированию для программируемых логических интегральных схем с архитектурой семейства 5510XC производства ПАО «Микрон», а также по применимости метода инъектирования ошибок при оценке сбоеустойчивости логических схем в базисе ПЛИС.

Определенный интерес вызывает статья, подготовленная сотрудниками Акционерного общества «Научно-исследовательского института молекулярной электроники», в которой рассматриваются различные варианты конструкции LDMOS-транзисторов, ориентированных на высокое напряжение питания.

Вашему вниманию представляется также 2-я часть статьи «Общая теория технологии и микроэлектроника: Вопросы метода и классификации», являющаяся продолжением работы «Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии», опубликованной в номере 1(165) за 2017 год нашего журнала. В статье обсуждаются методологические и философские положения, лежащие в основании авторского варианта общей теории технологии, раскрывается специфика технологии в приложении к техническим, биологическим и социальным системам, а также доказываемая возможность их абстрактно-технологического описания. Помимо того, сформулирован ряд классификационных критериев для технологий.



В работе сотрудников Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники рассмотрено применение метода «SILVACO TCAD» при моделировании процесса фотолитографии. Моделирование различных этапов фотолитографии позволило в доступной форме продемонстрировать возможности модуля Optolith. Работа может быть полезна технологам, применяющим фотолитографию на практике для повышения разрешающей способности проекционной литографии, а также для подавления негативных оптических эффектов, возникающих в резистивных пленках при экспонировании.

В работе сотрудника Публичного акционерного общества «Микрон» представлена молекулярно-кинетическая модель процесса осаждения слоев из газовой фазы, позволяющая оценивать скорость различных стадий процесса, а также количественно сопоставлять базовые характеристики слоев и прогнозировать их степень однородности при различных условиях роста.

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,  
д.т.н., профессор, академик РАН*

*Г.Я. Красников*

# МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ: ИНТЕГРАЦИЯ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ ПРОМЫШЛЕННЫМИ СРЕДСТВАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

► С. В. Гаврилов, Д. А. Железников, И. А. Липатов, И. В. Тиунов  
ИППМ РАН

В рамках данной работы был разработан маршрут автоматизированного проектирования для программируемых логических интегральных схем с архитектурой семейства 5510XC производства ПАО «Микрон». Для решения задач автоматизации проектирования с учетом курса на импортозамещение программных продуктов разработаны собственные программные средства, учитывающие специфику архитектуры ПЛИС семейства 5510XC. Программные средства собственной разработки обеспечивают проектирование на таких этапах маршрута, как технологическое отображение, кластеризация, размещение логических элементов и трассировка межсоединений. Кроме этого, разработанный и апробированный в ИППМ РАН совместно с АО «НИИМЭ» маршрут автоматизированного проектирования обеспечивает интеграцию с различными существующими промышленными средствами САПР: как коммерческими, так и свободно распространяемыми.

## DESIGN FLOW FOR DOMESTIC PROGRAMMABLE INTEGRATED CIRCUITS FOR SPECIAL PURPOSE: INTEGRATION WITH EXISTING COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS AND SOLUTION FOR PROBLEMS OF IMPORT SUBSTITUTION

S.V. Gavrilov, D.A. Zheleznikov, I.V. Tiunov, I.A. Lipatov  
IPPM RAS

In this paper, we developed the automated design flow for programmable logic integrated circuits with family architecture of 5510XC manufactured by PJSC «Mikron». For solving the problems of design automation taking into account the course for import substitution we have developed our own software that consider the specific architecture of the FPGA family 5510XC. This software is used at following stages of the design flow: technology mapping, clustering, logic elements placement and interconnect routing. The proposed design flow was developed and tested in the IPPM RAS in cooperation with JSC «NIIME» and provides integration with various existing industrial CAD systems: both commercial and open source distributed.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время широкое распространение получили подходы к решению пользовательских вычислительных задач на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) ввиду их относительной дешевизны по сравнению с заказными схемами и реконфигурируемой структуры. Однако для разработки такого класса устройств и решения пользовательских задач на их основе необходимо тесное взаимодействие между аппаратной и программной составляющими маршрута проектирования ПЛИС.

Существующие промышленные системы автоматизированного проектирования (САПР) нацелены на разработку ПЛИС определенных фирм (Altera, Xilinx, Actel и другие) и не обеспечивают поддержку проектирования отечественных ПЛИС, в том числе с архитектурой семейства 5510XC производства ПАО «Микрон». Разработанный в ИПИМ РАН совместно с АО «НИИМЭ» маршрут обеспечивает гибкость использования различных средств проектирования для отечественной архитектуры ПЛИС, а также обеспечивает интеграцию как с коммерческими САПР полузаказного проектирования от компаний Cadence и Synopsys, так и свободно распространяемым программным обеспечением (ПО) Yosys [1] и OpenTimer [2].

## ОПИСАНИЕ МАРШРУТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Под маршрутом автоматизированного проектирования интегральных схем с помощью САПР принято понимать согласованный между собой пакет программ, обеспечивающий проектирование по всему циклу – от получения технического задания до изготовления промежуточных или рабочих фотошаблонов. Похожая схема не теряет актуальности и в мире ПЛИС, лишь с тем исключением, что финальным результатом такого проектирования будет являться вектор загрузки (прошивки) для ПЛИС, содержащий такую конфигурацию ее блоков, которая формирует из нее устройство, удовлетворяющее требованиям технического задания.

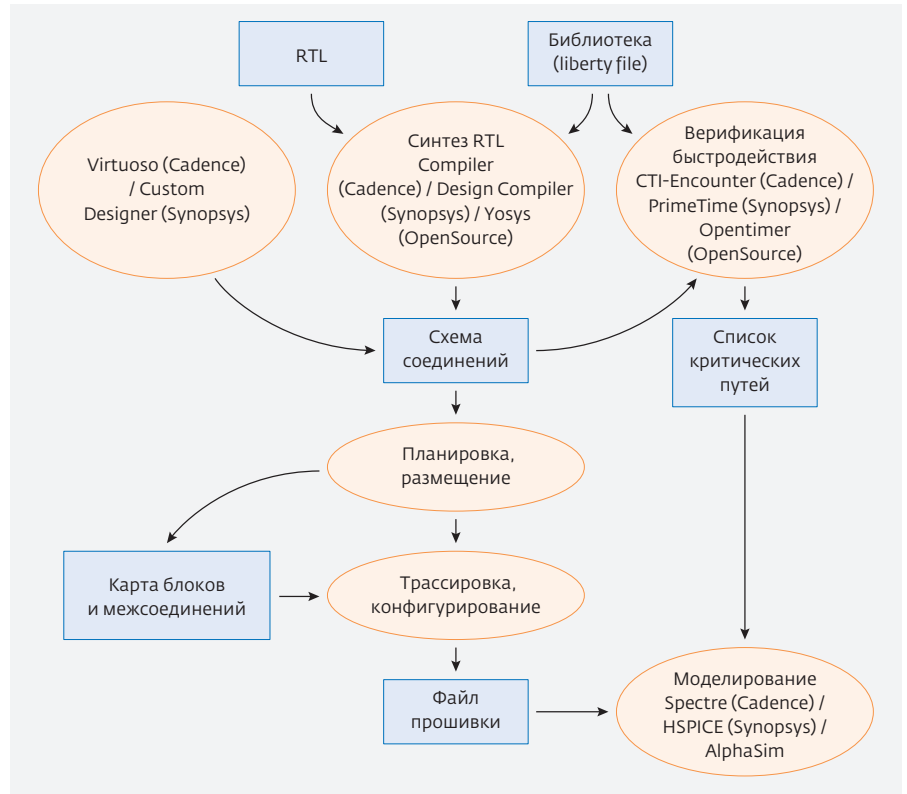


Рис. 1. Маршрут проектирования с использованием коммерческих и открытых средств проектирования и анализа

Разработанный маршрут автоматического проектирования для ПЛИС с архитектурой семейства 5510XC включает в себя такие этапы, как синтез поведенческого или регистрового описания устройства на языке Verilog в структурное; анализ временных характеристик устройства; упаковка и кластеризация; планировка кристалла и размещение логических блоков; трассировка межсоединений, а также генерация вектора загрузки ПЛИС. Все это позволяет глубоко прорабатывать параметры устройства и обеспечивает большую вариативность действий по устранению нарушений технического задания в случае их возникновения.

Для осуществления этапа автоматического синтеза поведенческого или регистрового описания проекта в структурное описание в терминах библиотеки элементов ПЛИС была осуществлена интеграция с программными средствами САПР полузаказного проектирования от компаний Cadence (RTL-Compiler), Synopsys (Design Compiler), а также со свободно распространяемым средством логического синтеза и оптимизации схем Yosys (рис. 1).

Для реализации этой части маршрута потребовалась разработка библиотеки логических элемен-

тов в формате Liberty, в процессе работы над которой была проведена характеристика более чем 900 логических элементов, элементов памяти, а также элементов периферии, что позволило автоматизировать процесс синтеза RTL (Register Transfer Level) описания в базе элементов ПЛИС. Кроме этого, была осуществлена разработка интерфейсных программ на командном языке Tcl [3] для последующей загрузки результатов RTL синтеза в программу кластеризации, автоматического размещения и трассировки межсоединений.

Верификация быстродействия синтезированных схем, в свою очередь, обеспечивается интеграцией маршрута с такими системами временного анализа, как:

- STI-Encounter (Cadence);
- PrimeTime (Synopsys);
- OpenTimer (OpenSource).

Моделирование на схемотехническом уровне в формате Spice и более точный анализ временных характеристик критических путей синтезированных схем в предлагаемом маршруте обеспечены интеграцией со следующими средствами:

- Spectre (Cadence);
- HSPICE (Synopsys);
- NL-Sim (ИППМ РАН).

Для проведения таких этапов проектирования, как технологическое отображение, кластеризация, размещение логических элементов и трассировка межсоединений, а также генерация вектора загрузки ПЛИС, в маршруте автоматизированного проектирования используются программные средства, разработанные в ИППМ РАН и учитывающие специфику архитектуры ПЛИС семейства 5510XC.

## АРХИТЕКТУРНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЭТАПЫ МАРШРУТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

На рис. 2 показаны этапы маршрута автоматизированного проектирования, для которых были реализованы собственные программные средства и алгоритмы. В качестве входных данных используется технологическая информация о кристалле (Spice-описание схемы ПЛИС в формате CDL, топологическая информация в формате GDSII, граф коммутаций и межсоединений, карта расположения блоков памяти), а также синтезированное Verilog-описание проектируемой схемы.

### Препроцессоры XC PREP и XCY

Маршрут автоматизированного проектирования, разработанный в ИППМ РАН, объединяет в себе два подхода к решению задачи логического синтеза.

Суть первого подхода заключается в отображении исходного поведенческого или регистрового описания проектируемой схемы в библиотеку предварительно отхарактеризованных логических элементов посредством коммерческих программ логического синтеза: Design Compiler (Synopsys) или RTL Compiler (Cadence). Затем синтезированное иерархическое Verilog-описание раскрывается до плоского и передается препроцессору XC PREP, который осуществляет трансляцию в промежуточный список соединений на расширенном командном языке Tcl.

Второй метод заключается в трансляции исходного описания в технологически независимое с использованием блоков функционального генератора LUT (Lookup Table) и триггеров в базе элементов ПЛИС, которую обеспечивает свободно распространяемое ПО для логического синтеза Yosys в совокупности с программой для технологического отображения Berkley ABC [4]. В случае использования такого подхода с помощью Yosys генерируется плоское verilog-описание проектируемой схемы, которое передается препроцессору XCY [5]. Препроцессор считывает опи-

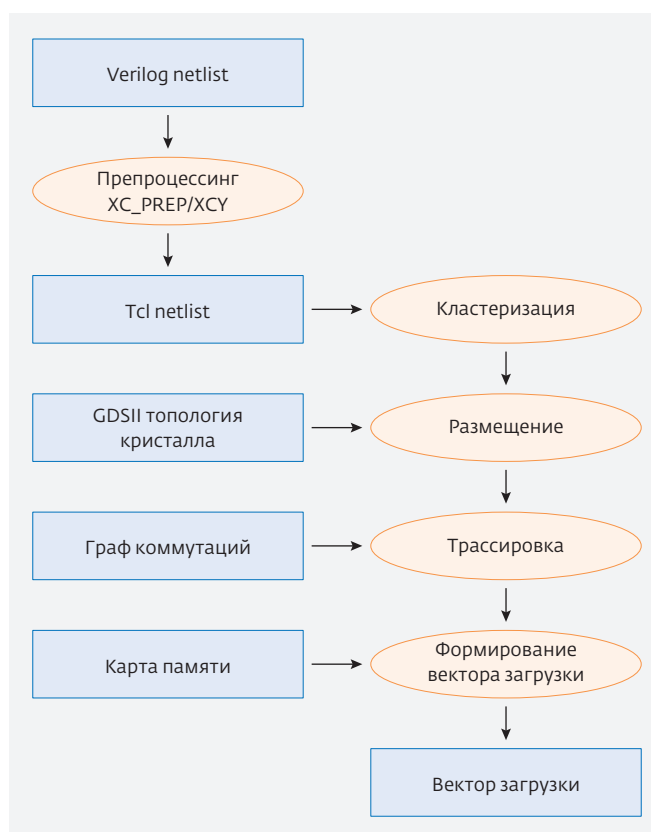


Рис. 2. Основные этапы маршрута проектирования, осуществляемые программными средствами собственной разработки

сание и производит его оптимизацию, учитывая особенности архитектуры ПЛИС семейства 5510ХС. Оптимизация заключается в объединении комбинационных элементов LUT с триггерами в рамках одного логического элемента ПЛИС, что в некоторых случаях может привести к существенному уменьшению площади, занимаемой схемой на кристалле, и, как следствие, уменьшению задержек. После этапа оптимизации препроцессор ХСУ генерирует список соединений схемы и синтезированную библиотеку логических элементов на языке Tcl.

Полученные список соединений схемы и библиотека логических элементов далее передаются в программу ХС, которая осуществляет последующие этапы кластеризации, размещения и трассировки проектируемой схемы на ПЛИС и генерирует конечный вектор загрузки.

### Кластеризация

Каждый логический блок схем семейства 5510ХС состоит из блока функционального генератора LUT, реализующего таблицу истинности, определяемую пользователем, и триггера с коммутируемыми связями. За счет использования цепей переноса и регистровых цепей все логические блоки ПЛИС объединены в группы логических блоков (ГЛБ), состоящие, в свою очередь, из 10 логических блоков. В таком разрезе топологии микросхем семейства 5510ХС задача кластеризации сводится к формированию из исходного списка соединений проектируемой схемы групп логических элементов с максимальной связностью. Благодаря такому подходу становится возможным оптимизировать использование трассировочных ресурсов внутри ГЛБ и максимально задействовать ресурсы регистровых цепей и цепей переноса.

Исходя из данных архитектурных особенностей микросхем ПЛИС семейства 5510ХС был разработан алгоритм кластеризации для автоматической компоновки групп логических блоков. Входными данными для алгоритма являются граф соединений  $G := (V, E)$ , где  $V$  – множество соединений между элементами, а  $E = V \times V$  – множество логических элементов проектируемой схемы. Алгоритм продолжает формировать группы логических элементов до тех пор, пока остаются свободные элементы в графе соединений  $G$ . При этом максимальная связность между элементами определяется с помощью матрицы смежности  $C$ , а максимальное количество элементов в группе задается с помощью переменной  $V_{\max}$ . На рис. 3 представлен псевдокод данного алгоритма, здесь  $V_i$  – группа логических элементов, а  $|V_i|$  – число элементов в группе.

### Псевдокод:

```

i=1
Пока в E есть элементы
Если |Vi|=0
    Найти элемент с наибольшим
    количеством связей emax
    Переместить emax из E в Vi
Иначе
    Если |Vi| < Vmax
        Найти элемент emax, наиболее
        связанный с Vi
        Переместить emax из E в Vi
Иначе
    i=i+1
  
```

Разработанный алгоритм кластеризации позволяет в автоматическом режиме формировать группы логических блоков из логических элементов наибольшей связности. Помимо этого, предусмотрена ручная загрузка групп логических блоков из командного файла на языке Tcl. Данный механизм поддерживает частичную загрузку групп логических блоков, так пользователь может описать в загружаемом файле только часть наиболее важных ГЛБ, а кластеризацию оставшихся свободными элементов алгоритм произведет в автоматическом режиме.

### Размещение логических элементов

После кластеризации логических элементов проектируемой схемы в группы следует этап размещения полученных ГЛБ на ПЛИС. Основной задачей на данном этапе является назначение периферийных ячеек ввода-вывода и групп логических блоков на свободные посадочные места с последующей оптимизацией полученного размещения.

Первым шагом на данном этапе является генерация начального размещения ячеек ввода-вывода и групп логических блоков. Данная операция может быть выполнена как автоматически, так и в ручном режиме с помощью загрузки начального размещения из файла на командном языке Tcl. Следующим шагом после генерации начального размещения является оптимизация размещения ячеек ввода-вывода и логических блоков. В технологических параметрах ПЛИС семейства 5510ХС определено относительно небольшое количество мест, доступных для размещения логических блоков – 570 (5510ХС1Т), 1270 (5510ХС2Т) и 2210 (5510ХС3Т). Учитывая предварительную кластеризацию логических блоков в группы, размерность задачи размещения уменьшается на порядок, и при максимальной заполненности кристалла необходимо оптимизировать размещение для 221 ГЛБ



на схеме 5510XC3T. Исходя из этого, для оптимизации размещения в разработанном маршруте используется алгоритм на основе моделирования отжига [6], [7].

Алгоритм моделирования отжига является стохастическим итерационным алгоритмом для нахождения экстремумов целевой функции и в целом хорошо известен. На каждой итерации алгоритма генерируется новое размещение путем перестановки пары элементов местами или перемещения одного элемента на свободное место. Далее рассчитывается оценочная стоимость полученного размещения и принимается вероятностное решение о его принятии или отклонении. Алгоритм построен таким образом, чтобы в начале его работы существовала вероятность принятия плохого решения, возможно ухудшающего размещение, что позволяет обходить локальные экстремумы целевой функции и повышает шанс нахождения глобального. С падением температуры во время работы алгоритма вероятность принятия плохого решения значительно снижается и в самом конце алгоритм можно считать жадным, то есть принимающим только хорошие решения.

### Трассировка межсоединений

Основная задача трассировки межсоединений – достижение полной трассируемости цепей с учетом минимально возможной задержки передачи сигналов. Задача полной трассируемости сама по себе является трудновыполнимой в ПЛИС из-за ограниченных трассировочных ресурсов такого класса схем. С учетом необходимости использования минимально допустимых путей для минимизации задержки передачи сигналов задача трассировки межсоединений ПЛИС дополнительно усложняется. Таким образом, успешная трассировка межсоединений требует выполнения двух условий, конкурирующих друг с другом.

За основу алгоритма автоматической трассировки межсоединений в разработанном маршруте автоматизированного проектирования взят алгоритм PathFinder [8]. Данный алгоритм основан на модификации классического алгоритма поиска кратчайшего пути на графе – алгоритма Дейкстры [9]. Для работы алгоритма трассировки необходим ориентированный граф, представляющий в ПЛИС ресурсы трассировки и их соединения. Множество вершин соответствует электрическим узлам или сигналам схемы, а множество ребер – переключателям или коммутационным элементам, которые соединяют эти узлы.

Основная идея алгоритма PathFinder – уравновесить задачи полной трассируемости и нахождения минимально возможной задержки сигналов в процессе трассировки. Особенность такого подхода

заключается в постепенной корректировке стоимости общих трассировочных ресурсов для их оптимального распределения. Полнота трассируемости достигается путем динамического регулирования перегруженности для всех отдельно взятых ресурсов трассировки на каждой итерации алгоритма. Поиск пути с минимально возможной задержкой, в свою очередь, реализован за счет выполнения быстрого временного анализа и учета его результатов при подсчете функции стоимости каждого найденного пути.

В базовый алгоритм PathFinder были внесены изменения, добавлена автоматическая генерация графа трассировки и учет однонаправленных ключей наряду с двунаправленными. Другим отличием от стандартного подхода является учет алгоритмом многопортовых соединений. Граф трассировки настраивается на основе автоматической загрузки Spice-описания схемы ПЛИС в формате CDL.

### Формирование вектора загрузки

В результате выполнения описанных технологических процедур на завершающем этапе конфигурирования формируется вектор загрузки для конечного устройства, загружаемый в ПЛИС. Для формирования выходных файлов прошивки схемы ПЛИС используется специальная информация о соответствии каждого узла схемы отвечающему за конфигурирование номеру бита в выходном векторе. Информация загружается из специального файла и представляет собой иерархическое имя конфигурируемого узла и отвечающий за него порядковый номер бита в файле прошивки: <иерархическое имя узла> <номер бита в файле прошивки>.

Выходные файлы выгружаются в нескольких форматах, в том числе:

- файл \*.prog содержит текстовое представление вектора загрузки в виде набора 0 и 1;
- файл \*.bin содержит бинарное представление вектора загрузки;
- файл \*.hex содержит шестнадцатеричное представление загрузочного вектора в формате Intel HEX32, использующего 32-битную адресацию с контрольной суммой в конце файла.

### ОПИСАНИЕ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА

Диалоговый интерфейс пакета программ XC представляет собой графический интерфейс среды для генерации прошивки ПЛИС с архитектурой семейства 5510XC, осуществляющий взаимодействие таких программ как: DC Compiler, RTL Compiler, Yosys, XC PREP, XCY, XC, AlphaSim, kLayout, NutMeg и других. Диало-

говый интерфейс является кроссплатформенным решением (поддерживает операционные системы: Windows XP/Vista/7/8/8.1/10, RHEL 5/6/7), поддерживает два языка (русский и английский) и позволяет:

- создавать проекты для различных типов кристалла и работать с ними;
- выбирать необходимое пользователю средство для решения задачи логического синтеза: Yosys, DC Compiler, RTL Compiler;
- редактировать описания схем, скриптов и других текстовых файлов в редакторе с подсветкой синтаксиса;
- исполнять команды языка Tcl через интегрированную консоль;
- открывать для просмотра графические файлы формата GDSII посредством программы KLayout [11];
- осуществлять схемотехническое моделирование средствами программы NL-Sim;
- просматривать результаты моделирования в программе NutMeg.

Диалоговый интерфейс позволяет создавать и сохранять отдельные проекты для проектируемых схем с возможностью выбора кристалла из семейства ПЛИС 5510XC, выбора рабочей директории и имени самого проекта. После создания или открытия проекта появляется основное окно работы с проектом (рис. 3), в котором отображаются основное меню, панели инструментов, дерево проекта, текстовый редактор, а также окно консоли интерпретатора языка Tcl, вывода ошибок и предупреждений.

Для запуска маршрута автоматического проектирования и генерации вектора загрузки ПЛИС необходимо добавить файл с описанием проектируемой схемы в соответствующую директорию дерева проекта в основном окне, выставить настройки в окне настроек проекта (рис. 4) и запустить программу кнопкой «Пуск». В настройках проекта можно выбрать программу, отвечающую за логический синтез (DC Compiler, RTL Compiler, Yosys), а также выставить необходимые

опции для настройки работы препроцессора ХСУ, оптимизации схемы, этапов размещения элементов и трассировки межсоединений.

После успешного исполнения программа предлагает открыть сгенерированный файл графического описания схемы в формате GDSII [10] с помощью программы KLayout. Кроме этого после завершения работы программы дополнительно может быть запущено spice-моделирование проектируемой схемы в программе NL-Sim через отдельное окно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе создания собственного маршрута проектирования полузаказных схем на основе ПЛИС архитектуры 5510XC были разработаны кроссплатформенные программные средства для решения задач логического синтеза, размещения и кластеризации логических элементов, трассировки межсоединений, конфигурирования и генерации файла прошивки. Автоматическая настройка на архитектуру ПЛИС при загрузке файла Spice-описания схемы

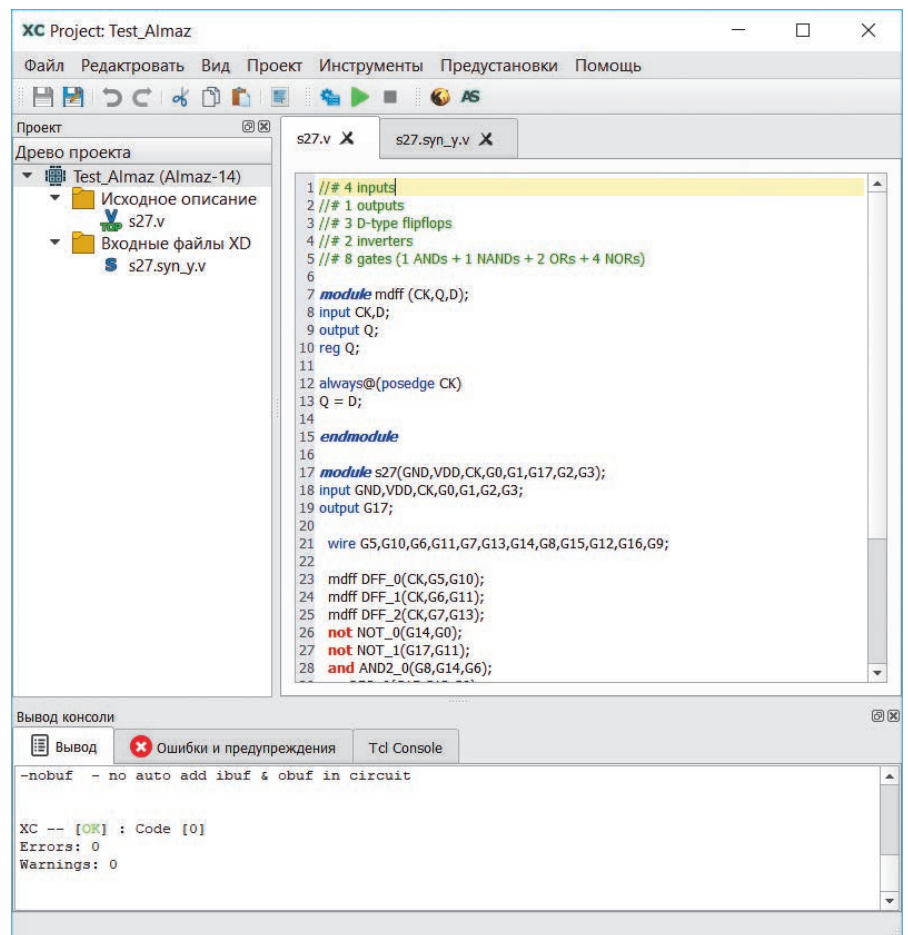


Рис. 3. Работа с диалоговым интерфейсом: основное окно проекта

в формате CDL и топологии в формате GDSII обеспечивает интеграцию с пакетами программного обеспечения Cadence и Synopsys для решения задач проектирования на различных этапах маршрута. Интеграция с альтернативными свободно распространяемыми и собственными программными средствами позволяет избежать полной зависимости от проприетарных продуктов и повышает адаптивность маршрута к сложным пользовательским сценариям. Описанный маршрут может быть использован для решения задач разработки полузаказных схем в условиях импортозамещения и использования свободно распространяемых программных пакетов. Изложенная стратегия успешно применена для развертывания маршрута проектирования в ИППМ РАН и апробирована на ряде успешно запущенных проектов.

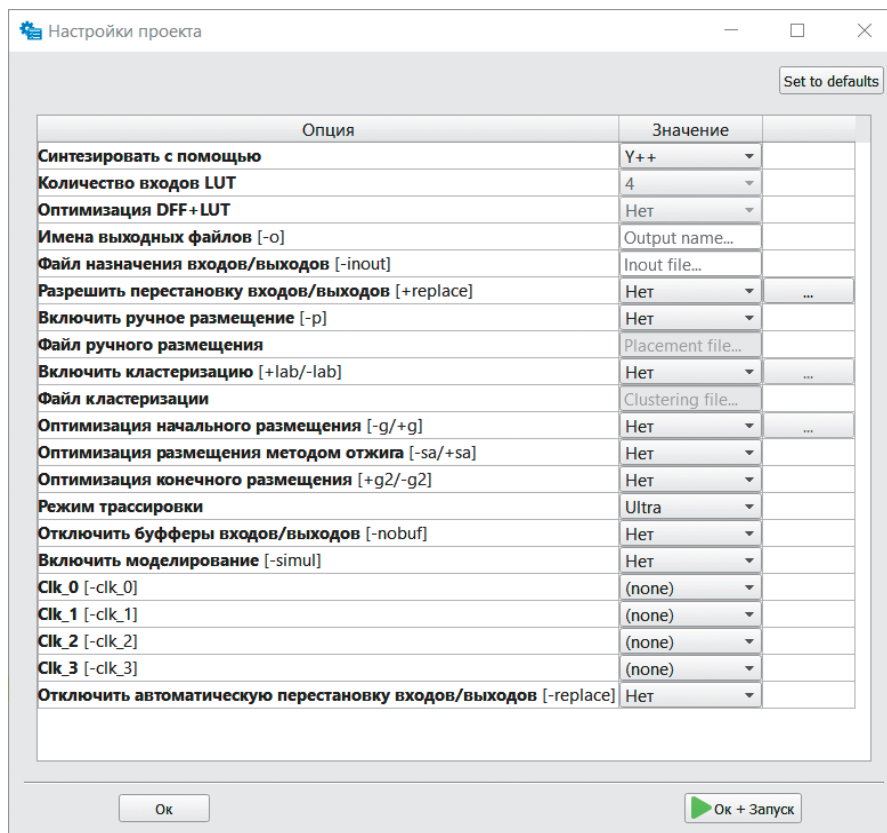


Рис. 4. Работа с диалоговым интерфейсом: окно настроек проекта

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

## ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-01778.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Huang T.-W., Martin D.F.** Wong OpenTimer: A High-Performance Timing Analysis Tool // Proceedings of IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), Austin, TX, 2015. P. 895–902.
2. **Wolf C., Glaser Yosys J.** A Free Verilog Synthesis Suite // In Proceedings of Austrochip, 2013.
3. Tcl – Tool Command Language, URL: <http://www.tcl.tk/>
4. ABC – A System for Sequential Synthesis and Verification, Berkeley Logic Synthesis and Verification Group, URL: <http://www.eecs.berkeley.edu/~alanmi/abc/>
5. **Tiunov I. V., Lipatov I. A.** Performance-driven technology mapping for XC5510 family FPGA // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), IEEE Conference of Russian, 2017.
6. **Betz V., Rose J.** VPR: A New Packing, Placement and Routing Tool for FPGA Research // International Workshop on Field Programmable Logic and Applications, 1997.
7. **Vorwerk K., A. Kennings, Greene J. W.** Improving Simulated Annealing-Based FPGA Placement with Directed Moves // IEEE Trans. Computer Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2009. Vol. 28. Is. 2. P. 179–192.
8. **McMurchie L., Ebeling PathFinder C.** A Negotiation-Based Performance-Driven Router for FPGAs // ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays, 1995. P. 111–117.
9. **Dijkstra E. W.** A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. 1959. Vol. 2. P. 269–271.
10. GDSII™ Stream Format Manual (B97E060), Release 6.0 // Calma. 1987.
11. KLayout – High Performance Layout Viewer And Editor, URL: <http://www.klayout.de/>

# КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ТРАНЗИСТОРОВ, ОРИЕНТИРОВАННЫХ НА ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ

► Г. Я. Красников, Е. С. Горнев, П. В. Игнатов, Д. С. Мизгинов  
АО «НИИМЭ»

В данной статье рассматриваются различные варианты конструкции LDMOS-транзисторов, ориентированных на высокое напряжение питания. Рассмотренные конструкции позволяют добиться более высокого напряжения пробоя и более низкого сопротивления в открытом состоянии по сравнению со стандартной конструкцией LDMOS-транзистора.

## CONSTRUCTIVE-TECHNOLOGICAL METHODS FOR IMPLEMENTING TRANSISTORS AIMED AT HIGH SUPPLY VOLTAGE

G.YA. Krasnikov, E. S. Gornev, P.V. Ignatov, D. S. Mizginov

MERI SC

In this article various designs of LDMOS transistors aimed at high supply voltage are considered. Designs considered allow to achieve higher breakdown voltage and lower on-resistance compared to a standard design of an LDMOS transistor.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы laterally diffused metal oxide semiconductor (далее – LDMOS) транзисторы являются одними из наиболее важных элементов для создания силовых интегральных схем. Данные транзисторы хорошо совместимы с низким уровнем напряжения питания, который используют другие компоненты интегральных схем. LDMOS-транзисторы могут использоваться в качестве переключателей в высокочастотных усилителях, при этом необходимо выполнение ряда требований, таких как минимизация падения напряжения в открытом состоянии, высокая плотность тока, высокое входное сопротивление и быстрое переключение из открытого состояния в закрытое. Стандартная конструкция LDMOS-транзистора изображена на рис. 1.

Канал LDMOS-транзистора формируется двойной боковой диффузией [1]. Эффективная длина канала определяется разницей по горизонтали в диффузии р-подложки и n<sup>+</sup>-области истока. Глубина боковой диффузии обычно составляет 60–85% глубины вертикальной диффузии. Для высоковольтных LDMOS-

транзисторов одной из важнейших характеристик является сопротивление области дрейфа, и здесь должен быть достигнут компромисс между напряжением пробоя канала и сопротивлением области дрейфа.

LDMOS-транзистор может быть выполнен на КНИ-структуре. Такие устройства имеют ряд преимуществ перед транзистором на объемном кремнии. Область изоляции между устройствами уменьшается,

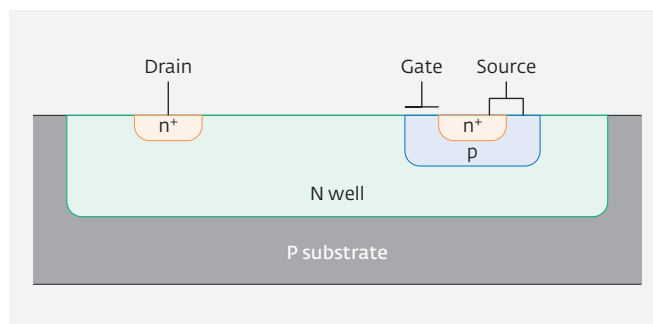


Рис. 1. LDMOS-транзистор на объемном кремнии

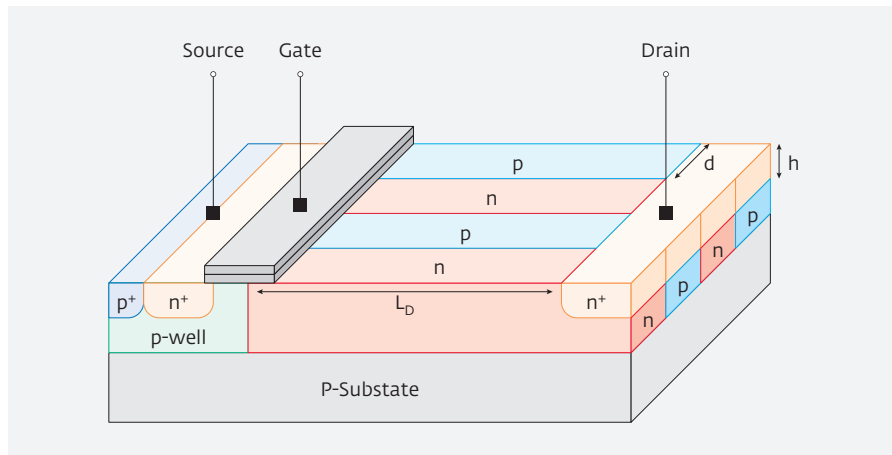


Рис. 2. Super junction LDMOS

и более низкие токи утечки приводят к значительному увеличению рабочей температуры. Захороненный окисел позволяет поддерживать более высоким электрическое поле, что делает возможным более высокое напряжение пробоя.

### LDMOS-ТРАНЗИСТОР С ЧЕРЕДУЮЩИМИСЯ СТОЛБЦАМИ N- И P-ТИПА (SUPER JUNCTION)

Super junction (далее – SJ) LDMOST (рис. 2) отличается от стандартного LDMOST тем, что область дрейфа заменена чередующимися сильнолегированными n- и p-столбцами. SJ LDMOST демонстрирует высокое пробойное напряжение благодаря компенсации зарядов в данных столбцах. Это достигается за счет полного обеднения чере-

дующихся n- и p-столбцов структуры, притом области обеднения, растущие от p-n-переходов, должны соединиться с соседними областями обеднения до того, как произойдет пробой. Низкое сопротивление SJ LDMOST в открытом состоянии достигается благодаря высокой концентрации легирующей примеси в n-столбцах, а также за счет числа параллельных проводящих путей.

Основной проблемой SJ LDMOST, изготовленного на p-подложке, является эффект обеднения, вызванный подложкой [2]. При изготовлении SJ LDMOST на p-подложке p-n-переходы формируются как между самими столбцами, так и между n-столбцами и p-подложкой. В закрытом состоянии транзистора n-столбцы обеднены соседними p-столбцами и p-подложкой, в то время как p-столбцы обеднены только n-столбцами. Это вызывает рост пространственного заряда в n-столбцах, приводя к дисбалансу зарядов между столбцами и, как следствие, значительному уменьшению пробойного напряжения.

Для уменьшения эффекта обеднения, вызванного подложкой, применяются КНИ-структуры. В случае использования КНИ-структуры, эффект обеднения, вызванный подложкой, значительно уменьшается при использовании достаточного по толщине слоя захороненного окисла (1-2 мкм).

Полностью устранить данный эффект возможно лишь путем частичного удаления той части подложки, которая расположена под слоем захороненного окисла (рис. 3).

Это обусловлено тем, что под слоем захороненного окисла в подложке образуется инверсионный канал наподобие того, как это происходит в МОП-конденсаторе [3]. Из-за данного канала возникает вертикальное электрическое поле, которое вызывает рост основных носителей заряда в столбцах p-типа и, таким образом, нарушает

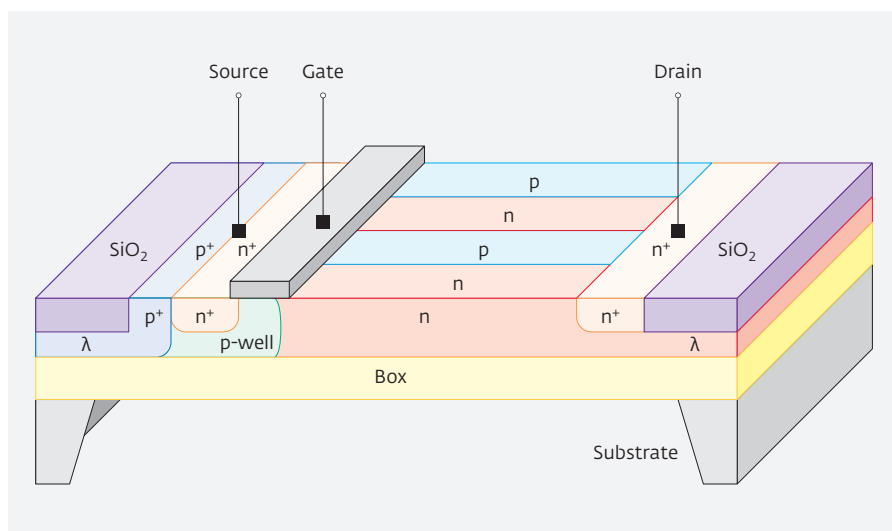


Рис. 3. SJ LDMOS с частично удаленной подложкой

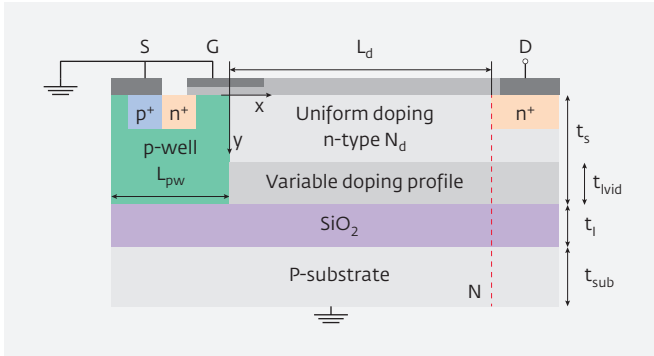


Рис. 4. LDMOS с латерально-неоднородным профилем легирования

баланс заряда между n- и p-столбцами, приводя к уменьшению пробойного напряжения.

### LDMOS-ТРАНЗИСТОР С ЛАТЕРАЛЬНО-НЕОДНОРОДНЫМ ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ДРЕЙФА

Данная конструкция (рис. 4) отличается от стандартной конструкции LDMOS-транзистора тем, что между слоем захороненного окисла и равномерно легированной областью дрейфа расположен слой с изменяющейся концентрацией легирующей примеси [5]. Концентрация легирования данного слоя линейно возрастает в направлении от истока к стоку. Механизм повышения пробойного напряжения в данном случае объясняется следующим образом. При подаче высокого напряжения на сток слой с изменяющейся концентрацией легирующей примеси обедняется свободными носителями заряда. В результате в области дрейфа на гра-

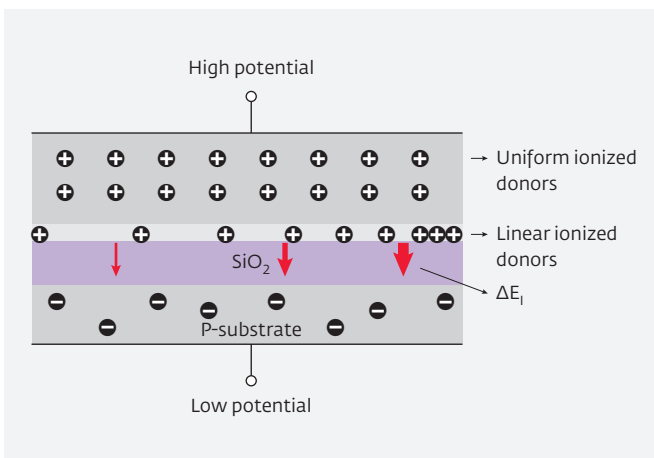


Рис. 5. Распределение донорной примеси в области дрейфа

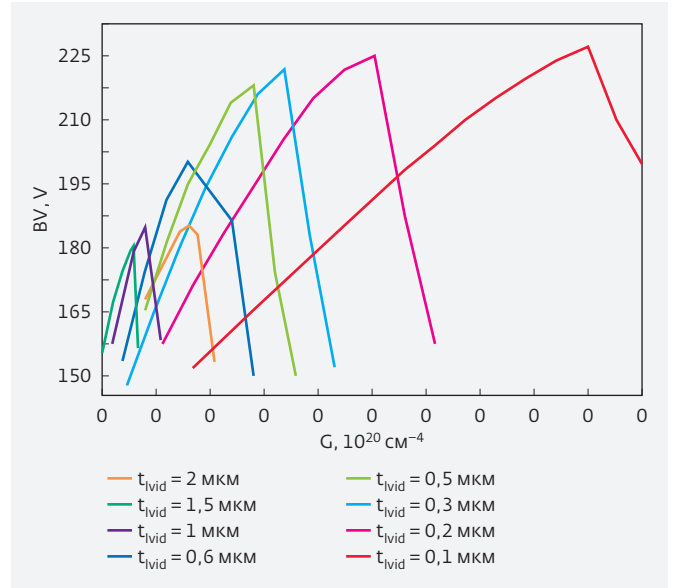


Рис. 6. Зависимость пробойного напряжения от коэффициента наклона профиля

нице раздела со слоем BOX накапливается высокая концентрация ионизированных доноров, как показано на рис. 5.

Концентрация ионизированных доноров будет линейно увеличиваться в направлении от истока к стоку. Это позволяет снизить пики поверхностного электрического поля в областях стока и истока, а также повысить величину поверхностного электрического поля в средней части области дрейфа.

Таким образом, данный слой позволяет предотвратить преждевременный пробой устройства. Толщина данного слоя может достигать толщины приборного слоя, но в таком случае эффективность применения данного технологического приема будет ниже. На рис. 6 изображены зависимости пробойного напряжения транзистора от линейного коэффициента, который определяет наклон профиля легирования для различных толщин слоя ( $t_{\text{ivid}}$ ) с латерально-неоднородным профилем легирования.

### LDMOS-ТРАНЗИСТОР СО СТУПЕНЧАТОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ ЗАТВОРА

Конструкция, изображенная на рис. 7, отличается от стандартной конструкции LDMOS-транзистора тем, что затвор разделен на три части, а толщина подзатворного окисла ступенчато увеличивается в направлении от истока к стоку. Ступенчатая конструкция затвора позволяет добиться более равномерного распределения поверхностного электриче-

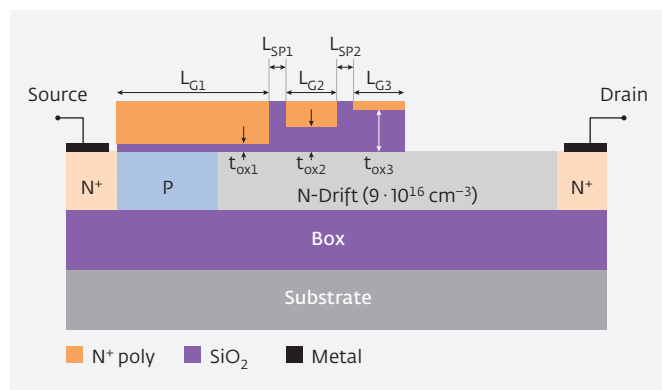


Рис. 7. LDMOS со ступенчатым затвором

ского поля, уменьшить емкость затвор-сток, а также повысить концентрацию легирования области дрейфа [4]. Это позволяет добиться более высокого значения пробойного напряжения и снизить сопротивление транзистора в открытом состоянии.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Marshall A., Natarajan S.** SOI design: analog, memory, and digital techniques. Kluwer Academic Publishers, 2002. P. 51-52.
2. **Park Il-yong C., Andre C., Salama T.** Super Junction LDMOS Transistors - Implementing super junction LDMOS transistors to overcome substrate depletion effects // IEEE Circuits and Devices Magazine. 2006. Vol. 22. Is. 6. Nov.-Dec.
3. **Hu C., Li M., He X. and Sun W.** A Review of Super Junction LDMOS // IETE Technical Review. Jul/Aug2011. Vol. 28. Is. 4. P. 327-335. 9 p. 22 Diagrams, 1 Chart.
4. **Jagadesh Kumar M., Radhakrishnan Sithanandam.** Extended-p+ Stepped Gate LDMOS for Improved Performance // IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 57. No. 7. JULY2010.
5. **Jingjing Jin, Shengdong Hu, Yinhui Chen, Kaizhou Tan, Jun Luo, Feng Zhou, Zongze Chen, Ye Huang.** Improving Breakdown Voltage for a Novel SOI LDMOS with a Lateral Variable Doping Profile on the Top Interface of the Buried Oxide Layer // Advances in Condensed Matter Physics, Volume 2015 (2015), Article ID762498, 6 p.

# ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ТЕХНОЛОГИИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА: ЧАСТЬ 2. ВОПРОСЫ МЕТОДА И КЛАССИФИКАЦИИ

► Г. Я. Красников, Е. С. Горнев, И. В. Матюшкин  
АО «НИИМЭ»

Обсуждаются методологические и философские положения, лежащие в основе авторского варианта общей теории технологии. Раскрывается специфика технологии в приложении к техническим, биологическим и социальным системам и доказывается возможность их абстрактно-технологического описания. Введено понятие пантехнологии. Сформулирован ряд классификационных критериев для технологий.

## GENERAL THEORY OF TECHNOLOGY AND MICROELECTRONICS: PART 2. ISSUES OF METHODOLOGY AND CLASSIFICATION

G. Ya. Krasnikov, E. S. Gornev, I. V. Matyushkin

MERIS C

The methodological and philosophical foundations underlying the author's version of the General Technology Theory are discussed. The specificity of technologies in the application to technical, biological and social systems is revealed and the possibility of their abstract technological description is proved. The concept «pantechology» is introduced. Some classification criteria for technology are formulated.

П риступая к созданию общей теории технологий (ОТТ), мы неизбежно должны начать с формулировки исходных общеметодических и философских установок, а также фиксации математического аппарата, который будем использовать. Это и составляет основную задачу второй части работы. Побочную, но не менее, как оказывается, важную задачу составляют упорядочение и одновременно спецификация технологий по их существенным, то есть не являющимся случайными, признакам.

В первой части нами был сформирован корпус основных источников по ОТТ. Одна важная работа Миронова А. В. [1], опубликованная недавно, выпала из нашего поля зрения. Кроме того, работа Романенко [2], как наиболее законченный вариант ОТТ, еще не подвергалась нами критическому анализу. Поэтому, продолжая тему первой части, вначале обсудим эти две работы.

## НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО РАБОТАМ МИРОНОВА И РОМАНЕНКО

Миронов [1] принадлежит социоисторическому направлению работ по ОТТ. Как и ряд других авторов, он вводит понятие технической реальности, которая «только связывает социум и окружающую его действительность путем многочисленных преобразований... Вся живая и неживая природа, а также социальная жизнь пронизаны технической реальностью; она теперь может быть отделена от природы и социума только условно, с целью ее исследования» и которая «служит связующим звеном между человеком и обществом с одной стороны и геосферными оболочками – с другой». Критикуя технократизм, он замечает: «технология, техника и наука не предписывают общественного устройства». Совершенно справедливо автор замечает, что на Западе исследователи часто смешивают технику и технологию, воспроизводит представление о Великой Триаде (Наука,



Техника, Технология) и цитирует Маркса: «Машина столь же мало является экономической категорией, как и бык, который тащит плуг. Машина – это только производительная сила. Современная же фабрика, основанная на употреблении машин, есть общественное отношение производства, экономическая категория». Этот момент важен в различении производственного процесса (ПП) и технологического процесса (ТП), о чем мы писали ранее.

При анализе уровня «сумма технологий» (СТ) встает вопрос о шестом, самом высшем уровне описания, охватывающем все (!) имеющиеся в реальности и совместно эволюционирующие технологии. Поэтому правомерно назвать этот уровень описания пантехнологическим. Здесь мы на стороне Миронова в его споре с В. И. Даниловым-Данильяном: «Различия в характерном времени протекания эволюции для Вселенной, геологических процессов, биосферы и социума не могут служить обоснованием для отказа от рассмотрения коэволюционных процессов. Коэволюция как раз и заключается в установлении некоторого равновесия между процессами в различных сферах. И человечество тут не исключение, а самый быстро эволюционирующий элемент общей системы (пантехнологии – Авт.)».

Хотелось бы предостеречь от мистификации Великой Триады, но, как мы полагаем, определенная степень поэтики тут допустима. Как верно замечает Миронов: «Наука – общая методологическая основа изменения, техника – инструмент трансформации, **технологии – алгоритмы социальной организации по преобразованию окружающего мира...** Исторически наука (знание), техника и технологии долгое время развивались изолированно друг от друга, иногда переплетаясь, но и сохраняя самостоятельность... Новый феномен «технологий» остается неопределенным и таинственно неразличимым за понятием «техника»..., технике приписываются все новые и новые свойства, а другой реальный участник происходящих трансформаций – «технологии» – остается в тени». Интересно воспроизведенное автором определение техники (П. К. Энгельмейер [3]) как «возможность и способ вплетения воли человека в число сил природы».

Очень удачно автор вводит термин «технэ»: «технэ – это способности и навыки человека, которые имеют отношение к преобразованию объектов. Это воздействие человека на природу осмысленное, неспонтанное, преследующее определенные цели». Однако затем он неоправданно расширяет свое определение; мы позже переопределим «технэ» с учетом факта существования естественных технологий.

Автор дает технологии уточняющее определение: «технология – социально приемлемая форма организации использования техники на основании научного знания... Приемлемость формы организации означает, что использование техники **повторяется** в различных коллективах...». Хотя взгляд автора ограничен апертурой социального заимствования, но он интуитивно схватывает важность феноменологического аспекта повторяемости – того, что прежде всего отличает технологию от алгоритма и выражается авторским примером о заколачивании гвоздей микроскопами.

Приводятся взгляды философа Ж. Эллюля на Единую технологию, и мы солидаризируемся с их критикой автором и утверждением, что технологии многообразны. Предлагаемая Эллюлем [4, 5] Единая технология близка к выделенному нами уровню «сумма технологий» (или даже к шестому уровню пантехнологии), но и тогда говорить о Единой технологии как едином метафизическом объекте, на наш взгляд, непозволительно, зато вполне допустимо говорить об абстрактной технологии.

К шестому уровню описания технологии может быть отнесен тезис Миронова – «для техники создание коммуникаций является случайным действием, а для технологий создание устойчивых социальных коммуникаций – основное свойство. Возьмем утверждать, что каждое техническое устройство приобретает социальное значение только будучи включенным в соответствующую технологию». Стоит отметить, что в философии новейшего времени проблема коммуникативности с середины XX в. вышла на центральное место. И еще раз мы видим, что техника сама по себе лишь вершина айсберга технологии.

Миронов де факто использует нашу терминологию для 5-го уровня, еще раз показывая её релевантность и востребованность, и весьма емко перечисляя задачи СТ-уровня: «На мой взгляд, речь может идти **о сумме технологий**, часть которых уже объединена в единое целое, а часть находится и всегда будет (по мере возникновения нового) находиться в процессе интеграции. При этом необходимо помнить, что постоянно создаются новые технологии, которые не только не интегрированы в существующие технологии, но и конкурируют между собой. Эта конкуренция приводит к созданию новых стандартов на базе «победившей» технологии».

Также автором удачно введен термин «сопряжение» о часто встречаемом феномене: «Под сопряжением я понимаю возможность использования двух и более технологий как единой технологиче-

ской цепи, то есть новой технологии для создания объектов». Соответствующий эквивалент у Романенко – иерархия технологий. С другой стороны, автор, оппонировав Б. К. Кудрину, поверхностно смотрит на эволюцию технологий: «Возможность самонастройки технологий без участия человека – одно из ярких мифических и мистических представлений об их внутренних свойствах. Для осуществления сопряжения технологий необходима осознанная деятельность людей по их сопряжению». Этот тезис мы решительно отвергаем, хотя бы вследствие широкого распространения процессов самоорганизации в материи, включая и социальную ее форму. Общая теория систем, наоборот, подсказывает нам искать элементы самоорганизации в таком сложном объекте, как технология или их система. Хотя, конечно, нельзя пренебрегать и социальной детерминантой, и фактором случайности в технологическом развитии. Автор подкрепляет свои доводы, описывая тупиковые, то есть не востребованные обществом, изобретения в контексте универсальности техники (с этой связи можно вспомнить концепцию универсальных функциональных блоков Уголева [6]).

Романенко, как указывалось нами ранее, принадлежит кибернетическому направлению, а его книга [2] вносит существенный вклад в ОТТ. Несмотря на попытки автора выстроить стройную систему дефиниций, ему удалось это сделать лишь частично. Книга богата примерами, удачными выглядят обращение к системе обозначений Коллера (1976), к принципу морфологического ящика, восходящего корнями в античность (Р. Луллий), и попытка классифицировать промышленные технологии исходя из первобытного общества (и принципа «от простого к сложному»). Однако это богатство часто уходит автора в сторону. В итоге, несмотря на внешнее обилие определений и утверждений, содержание оказывается «рыхлым», не в последнюю очередь потому, что авторское понимание технологии меняется на протяжении изложения.

Проанализируем прежде всего попытки Романенко классифицировать технологии. Хотя автор не вводит буквально «технэ», он выставляет фиксацию его на бумаге, в памяти человека и т. п. необходимым условием наличия технологии. Автор вводит представление о степенях жесткости алгоритма, то есть вариациях в последовательности итераций (на примере кулинарии). В этом он видит отличие от искусства: «Именно возможность, действуя по указаниям (рецептам, описаниям), получать определенные результаты, не обязательно разрабо-

танные исполнителем (актером), отличает технологию от искусства. Не случайно еще в первой половине XX в., когда воспроизводить процессы выращивания высококачественных кристаллов было очень трудно, говорилось о том, что рост кристаллов – это не наука (технология), а искусство». Сразу вспоминается классическая книга Дональда Кнута «Искусство программирования»; но то, что казалось искусством в 60-е годы, стало технологией в 80-е.

Романенко вводит семичленную классификацию технологий по задачам: 1) изготовление условно однородного материала; 2) создание заданных неоднородностей формы материала; 3) создание заданных неоднородностей структуры материала; 4) соединение разнородных материалов в виде композиций; 5) перемещение и складирование; 6) передача и обработка информации; 7) обеспечение и ремонт. На наш взгляд, здесь смешение классификаций и по критериям, и по уровням (например, 1-я введена удачно, относясь скорее к уровню технологии, 2-я и 3-я группа классифицируют ТО, но не технологии, а 7-я вовсе не относится к сфере технологий). Затем вводится деление по масштабу: микро-, макро- и мегатехнологии. Мы считаем этот признак во многом случайным, для социальных технологий он вовсе отпадает. Далее автор вводит критерии организованности технологий по времени и пространству. По признаку диверсификации выпуска продукции Романенко выделяет массовые (много изделий одного типа – производство карточек памяти DDR3), совместные (несколько типов изделий небольшого объема выпуска – так называемые схемы ASIC) и индивидуальные (лучше назвать персонализированные, когда имеем единичные экземпляры, совсем незначительно отличающиеся, но во множестве вариантов: пример – изготовление маек с изображением заказчика на груди или спине). С некоторым сомнением, но мы склонны принять этот признак существенным, так как от него зависит структура производства и соответственно особенности уровня ПП. Косвенно он также свидетельствует о фазе жизненного цикла, достигнутой технологией в ее эволюционном развитии.

По критерию временного распределения изделий автор выделяет три класса технологий: последовательные или конвейерные, когда изделия выпускаются одно за другим; групповые, когда изделия выпускаются сразу партией одновременно (выпускники вуза, микросхемы); параллельные, когда выпуск происходит в несколько потоков (возможно, сюда относится цикл Кребса, как он функционирует в реальных условиях биохимии клетки). По нашему

мнению, групповой способ обработки и групповое свойство в формулировке Романенко близкие и связанные, но несколько различающиеся вещи; это различие нуждается в уточнениях. По особенностям временной реализации технологии автор делит технологии на разовые, периодические, циклические (в микроэлектронике имеет место цикл операций от одной фотолитографии до другой), непрерывные (выплавка металла в домнах), квазинепрерывные (розлив молока в бутылки). В нашем понимании разовых технологий не существует; додумывая за Романенко, пример: призыв людей в армию при ведении войны (и формирование воинских частей) или выпадение молочных зубов у детей. Пример периодической технологии – выпуск настенных календарей, удвоение хромосом при митозе, пищеварительные процессы уже при виде пищи. Принципиально, что длительное время технология может существовать в свернутом, «анабиотическом» виде, никак себя не проявляя; такие технологии свойственны живой клетке. Для непрерывных технологий остановка чревата последствиями. Принято считать, что остановка доменной печи более чем на 10 часов грозит остыванием металла в ней с последующим разрушением фундамента (возможен только «тихий ход» – это минимальные параметры дутья, при которых обеспечивается температурный режим, обеспечивающий наименьшую производительность печи). Остановка промышленного производства ведет к увольнению специалистов, иногда незаменимых, которые не всегда возвращаемы при восстановлении производства. Также, по нашему мнению, следует различать непрерывную технологию по способу реализации во времени от непрерывного способа выпуска продукции; этот вопрос также требует уточнений.

Романенко формулирует интересное утверждение-теорему, с которым мы склонны согласиться: *сложность технологии (технэ) превышает сложность целого изделия.*

Не обходит стороной Романенко важную проблему взаимодействия технологии с ее окружением. Однако рассматривается она в основном с точки зрения конструктора новых изделий и предстает в виде «технологичности» или, как принято говорить [7], конструкторско-технологических ограничений (КТО) – «технология выдвигает перед разработчиками определенные требования, которые часто называют технологичностью».

Автор вводит представление о предтехнологической деятельности (практически так же, как и мы, – см. далее о методиках) – «Взять в руки ложку,

застегнуть пуговицу, нажать на кнопку пульта – это действия или же их группы, которые относятся к предтехнологической деятельности... Реальная техническая и технологическая деятельность человека начинается с объединения элементарных предтехнологических действий в последовательности, которые могут быть названы начальными операциями. Одновременно в деятельность человека начинают вводиться начальные технические средства. Исторически к ним можно отнести палку, камень и т.д. Сочетание начальных операций и начальных средств – это стартовая точка архаических технологий и архаических технических устройств». Также Романенко обращает внимание на смысловое различие между передачей информации и коммуникацией. Мы солидарны с ним, поскольку первое относится к информационным технологиям, а второе – к социальным (когнитивным); для понимания этого различия нужно также тонкое, учитывающее нюансы, исследование. Однако как часто передача информации и коммуникация осуществляются неразрывно в рамках одной промышленной технологии!

### **ТЕЗИС ПЕРВЫЙ: АБСТРАКЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНИМА К ЛЮБОЙ ТЕХНОЛОГИИ, ПРОЯВЛЕННОЙ В РЕАЛЬНОСТИ (ТЕХНИЧЕСКОЙ, ЖИВОЙ ИЛИ СОЦИАЛЬНОЙ)**

Наш подход к ОТТ легче всего понять, обратившись к духу философии Платона. Мы постулируем существование эйдоса технологии, объективируемого в конкретных технологиях: во-первых, в области техники (то, что привычно); во-вторых, в области живых систем (то, чему должно быть дано обоснование); в-третьих, в области социума (то, что находится еще в становлении). И, таким образом, главной целью философии технологии является проникновение и познание сущности этого эйдоса, возможно, даже в большей степени путем умозрения, чем путем обращения к имеющимся технологическим феноменам. Образ, или идея, или эйдос технологии, парящий в интеллигибельном мире, преломляется в мире феноменальном, выражаясь по-своему в технике (например, технология микроэлектроники, сотворенная усилиями исследовательских групп Шоккли и Килби в 50-х гг. XX в.), в биологии (технология деления соматических клеток, без участия человека сотворенная Природой за миллионы лет эволюции – или опосредованно Богом, если мы придерживаемся религиозных взглядов) и, наконец, в человеческом

обществе (в качестве частного примера приведем технологию передачи монархической власти в феодальных обществах). Для философов идеалистического направления эйдос технологии существовал, возможно, до начала Вселенной, но открылся нашему уму только недавно, и, возможно, принципиально иррационален. С позиций современного нео- или постпозитивизма мы постулируем следующее: достижима логически корректная формулировка (и математическая формализация) понятия «абстрактная технология», обладающая релевантностью и дескриптивностью по отношению к многообразию фактов нашего опыта, выделенных по признаку телеологичности процессов. Иными словами, из всего многообразия конкретных технологий в привычной области техники **мы действительно можем** дедуктивно образовать общее понятие (или математическую конструкцию), причем под область его действия будут попадать множества биологических и социально-значимых процессов, изначально далеких от и чужеродных технике. Слово «техника» мы понимаем в вещном смысле как «машина» (machine), но не как «метод» (technique).

Если первая часть такого тезиса вряд ли вызовет возражения, несмотря на то, что в самой технике, современной или прошлых времен, известны, как кажется, совершенно непохожие друг на друга технологии, то вторая часть отнюдь не тривиальна. Достаточно вспомнить давнюю дискуссию о правомерности перенесения методов математического моделирования из естествознания в гуманитарную сферу. Или, если обратиться к философии рубежа XIX–XX вв., вспомнить демаркацию В. Дильтема наук о природе и духе – «природу мы объясняем, духовную жизнь мы понимаем». И даже если вынести за скобки нечетко очерчиваемые в гуманитарных дисциплинах социальные технологии, в области которых авторы статьи не считают себя компетентными, остается вопрос о переносимости «технологии» на биологические процессы. Мы даем на него, безусловно, положительный ответ, но, признавая весомость имеющихся возражений Contra (например, технология рукотворна и управляема, а клеточные процессы сложны в управлении), аргументы Pro представим далее. Де факто речь идет об эквивалентности двух определений (и, вообще говоря, двух взглядов) – нашего и академика А. М. Уголева. Вот одна примечательная цитата из него [6]: «Долгое время мне казалось, что не стоит науку о сложнорегулируемых процессах связывать с получившим слишком утилитарное истол-

кование термином «технология». Представлялось, что более адекватными могут быть термины «процессология» или «эргология»..., процессы в живых системах могут быть охарактеризованы как естественные технологии, то есть как **некоторая система операций**, обеспечивающих определенный эффект». Уголев не приводит доказательства эквивалентности, но обе формулировки им же приведены, первая взята из среды биохимиков и физиологов, а вторая отражает обыденное представление о технологии (в технике).

Итак, **мы верим**, что все многообразие технологий в трех сферах сводимо к одной абстракции. Этот тезис назовем **тезисом дескриптивности**.

Однако в чем фундаментальное основание тезиса дескриптивности? По-видимому, его следует искать в сущности (essentia, лат.) самой технологии, в ее имманентных свойствах, атрибутах (в отличие от случайных свойств, т.е. модусов). И здесь нам удобно обратиться к языку философии Аристотеля и напомнить, что популярное слово «информация» однокоренное с «формой» (formando, лат. – формировать, рождать), а в одной из современных трактовок – «мера сложности структур, мера упорядоченности материальных систем» [8]. Среди четырех, обычно иллюстрируемых на школьном (и, кстати, по сути, технологическом) примере кувшина и гончара, аристотелевых причин синтез формальной и действующей и есть, хотя бы и в грубом приближении, технология. В этом смысле технология является объектом для гилеморфизма [9] – учения о форме и материи как основных принципах бытия (термин используется с конца XIX века), причем речь идет скорее о второй форме по сравнению с первой, природной формой; заметим, что технику часто называют «второй природой», подчеркивая искусственность её происхождения. Рассуждая по аналогии, «второй» формой можно назвать структуру целевого изделия, а «третьей» формой – назвать **технэ**, т.е. информацию (знание) о режимах и последовательности технологических операций, без которой осуществление последних невозможно. Вторая форма, будучи ограничена первой (свойствами исходных материалов), порождает, но не детерминирует третью.

В большинстве случаев, как в микроэлектронике, изделие получает более сложную форму, чем в исходном состоянии; лишь в биохимии катаболизм столь же распространен, что и анаболизм. Задача технологии и состоит в придании материи, неважно какой – физической, биологической, психической или социальной, – требуемой формы. При этом признак «требуемость» можно почти равносильно заме-

нить на «функциональность», поскольку создаваемое «изделие» обязательно несет на себе какую-то функцию: техническую, энергетическую, эстетическую и пр. Трудно и, пожалуй, невозможно привести пример нефункционального изделия. Как известно, Аристотель подвергался жесткой критике со стороны естествоиспытателей за понятие конечной (финальной) причины, её считали метафизической и ненаучной выдумкой. ОТТ восстанавливает авторитет Аристотеля и соответственно «конечной причины». Невозможно мыслить технологию в отрыве от изделия, а само изделие – в отрыве от его функциональности (а для технических технологий можно и продолжить: а функциональность мыслить в отрыве от спроса и безубыточности). Еще раз: вторая форма логически предшествует третьей, но во времени (физически), наоборот, третья форма предшествует второй. Для микроэлектроники, грубо говоря, вторая форма – это структура СБИС (не только топология, то и логико-электрическое описание), а третья форма – это описание технологического маршрута.

Таким образом, можно ввести первое после «технологии» понятие ОТТ – изделие – как того, ради чего существует технология. **Изделие – это один из или единственный конечный (целевой) продукт, сопряженный с технологией и обладающий функциональностью.** Если, например, в микроэлектронике изделие появляется в конце – чип, то в других технологиях (цикл Кребса) целевые продукты возникают в ходе всего технологического процесса. Не всегда конечный продукт является конечным, т.е. возникает в конце цепочки ТО; например, при производстве колбас мясной фарш может идти в продажу в магазины, не дойдя до состояния колбасы или котлеты. Микроэлектроника является одним из ярких примеров технологии, когда форма господствует над материей: во-первых, изготовление и проектирование фотомасок (конечный результат проектирования микросхем), т.е. две технологии, сопряженные с технологией микроэлектроники, имеют дело прежде всего с формой; во-вторых, само производство микросхем, самих по себе сложных элементов, расположенных с высокой степенью интеграции.

Аналогом денег в естественных технологиях выступает величина свободной энергии Гиббса, и как мы знаем со времен (1945) знаменитой книги Шредингера [10], процессы в живом организме как раз неестественны (Вернадский и его учение о трех видах вещества) с точки зрения термодинамики, а значит с большой долей вероятности – технологичны. Неестественные процессы, идущие

в сторону повышения энергии Гиббса, сопряжены с реакциями, идущими с понижением – обычно это  $ATP \rightarrow ADP + P$ . В производственных технологиях ничего не будет делаться, если не будет финансовых затрат на материалы, электроэнергию и труд. Низкая оплата труда операторов повышает риск человеческой ошибки, иногда даже и преднамеренной. Если говорить о несамопроизвольных процессах в социальных технологиях, то, по-видимому, они сопровождаются волевым усилием; иначе говоря, движителем естественных технологий выступает биохимическая энергия (как правило, в форме АТФ), движителем искусственных технологий – деньги, а движителем социальных технологий – воля.

Однако технология может использовать и самопроизвольные процессы (брожение вина в виноделии, засыхание лака или краски во многих производствах, любопытство ребенка в педагогике). В этой связи стоит заметить, что современная наноэлектроника в своем технологическом развитии широко использует механизмы молекулярной самосборки и, пожалуй, уже невозможна без них. Можно привести и более банальный, но одновременно и неожиданный пример: технологии сельского хозяйства используют самопроизвольные процессы роста растений (см. вышеприведенную цитату о «вплетении сил...»).

## ТЕЗИС ВТОРОЙ: ТЕХНОЛОГИЯ ЯВЛЯЕТСЯ СЛОЖНОЙ СИСТЕМОЙ, ТРЕБУЮЩЕЙ МНОГОУРОВНЕВОГО И МНОГОАСПЕКТНОГО ОПИСАНИЯ

На наш взгляд, тезис настолько очевиден/тривиален (и разобран в первой части), что даже не требует отдельного доказательства. Однако за банальной формулировкой скрываются «подводные камни». Данный тезис, назовем его **тезисом иерархичности**, лучше всего раскрыть через несколько утверждений, сформулированных в виде «вопрос-ответ»:

- Если технология – это система (процессов, если встать на динамическую точку зрения), то из элементов какого типа она состоит? Хотя такое разбиение зависит от аспекта и, вообще говоря, уровня рассмотрения, в грубом приближении можно выделить: 1) целевые объекты преобразования (субстрат, полуфабрикат, изделие); 2) нецелевые объекты преобразования (отходы); 3) материальные условия преобразования (оборудование, расходные материалы, энергия, операторы как орудия); 4) технэ как форму преобразования (операторы как носители информации, регламент); 5) среду преобразования (в микроэлектронике – «чистая комната»).

Сама же система процессов разбивается, как раскрыто нами в первой части, на 5 уровней. Пантехнологический (ПТ) уровень описания – это наивысший, последний уровень описания, когда мы стремимся объединить суммы технологий, выделенные в технике, биологии и социуме.

- Если технология – это совокупность (система) процессов/преобразований, то как понять, принадлежит ли технологии некий элементарный процесс? Что дает нам основание относить некоторому (физическому) процессу предикат «технологический», ведь в природе происходит множество процессов? Если говорить об искусственных (промышленных) технологиях, то таким основанием будет включенность исследователем данного процесса в цепочку процессов/стадий, приводящих к получению изделия. Иными словами, мы ссылаемся на целенаправленность общего процесса, причем имплицитно предполагается конечная причина в виде конечного изделия и объективно присутствующего Творца технологии. Для микроэлектроники это не только пионер Джек Килби, но и высший менеджер любого промышленного предприятия. Если говорить об естественных технологиях, то выбор основания уже не столь очевиден, ведь в явном виде никто целей не ставит. Однако наш ответ будет тем же: мы ссылаемся на телеологичность общего многостадийного процесса. Однако источником этой телеологичности выступает не столько Творец, а сколько сам исследователь. Если мы обнаружим в связке биологических процессов некоторую цель, то это достаточное основание считать любой процесс из этой связки «технологическим». Например, все процессы клеточной дифференциации, свойственные пренатальному развитию, ведут к рождению нового живого существа, которое в некотором роде уподобляется конечному изделию. Таким образом, эта привнесенная субъектом телеологичность имеет объективное основание и несет в себе минимум субъективности.
- Если технология – это иерархическая система, то возникает опасность «дурной бесконечности», когда невозможно выделить наименьший и наибольший элементы, т.е. где остановиться на пути агрегирования и, наоборот, редукции? С данной проблемой не справился Романенко, хотя сущность вопроса эти авторы осознали и, решая вопрос, ввели понятия «технологическая цепь» и «технологическое поле». Чтобы пояснить наше решение, введем вначале понятие «**технологический подход**» в качестве нового методологического принципа научного исследования – по аналогии с системным подходом. В соответ-

ствии с технологическим подходом из фрагмента реальности выделяется множество процессов, распределенных по физическому пространству и времени, которое логически упорядочивается для обнаружения присутствия технологии. Напомним, что системный подход также предполагает выделение множества объектов, связанных между собой взаимодействиями более сильными, чем их взаимодействие с окружающей средой. Первый шаг в технологическом подходе – найти, что является изделием (или, если вспомнить о биохимии, изделиями), а второй – восстановить цепочку процессов, линейную или разветвленную, ведущих к его появлению. Однако выбор изделия во многом субъективен, как и выбор начальной точки этой цепочки. Часто технологии последовательно сопрягаются, например, технология получения кремния электронного качества и технология микроэлектроники сопрягаются через изделия – «кремниевая пластина», и почему бы их не рассматривать как одну более сложную технологию (да еще, если учесть, что кремниевые пластины помимо микроэлектроники нигде не используются)? А если допустить сопряжение через материалы и компоненты, как в сборочном производстве, то непонятно, где заканчивается конкретная технология. В первой части, рассматривая уровень производственного процесса, мы предложили за критерий ограничения сверху взять **критерий пространственной близости**, когда процессы происходят в рамках одного предприятия или организационной структуры. Более точно – можно говорить о критерии пространственно-временной или иной (организационной, семантической и т.д.) близости. По этому критерию производство кремния и кремниевых чипов – две разные технологии ввиду разделенности процессов в пространстве. Очевидно, что нечеткость понимания «близости» лишает критерий некоторой степени объективности. Кроме того, ввиду феномена аутсорсинга в экономике (и, возможно, аналоги есть в естественных клеточных технологиях), когда часть операций-работ выносятся за рамки одной фирмы и/или одного здания, сам критерий ставится под сомнение. Здесь мы сохраняем оптимизм и полагаем, что **проблема аутсорсинга** может быть снята при более глубоком исследовании. Но нужен еще критерий ограничения снизу, чтобы минимальный процесс, который мы называем технологической операцией, не размылся в дроблении, или сама технологическая операция вдруг не превра-

тилась в целую технологию. В технических статьях по микроэлектронике, например, встречается оборот «технология химико-механического полирования», предполагая, что само полирование многостадийно; более удачный пример можно увидеть в фотолитографии (точнее – переносе изображения), процессе сложном и ключевом для микроэлектроники. Не похожа ли ситуация на матрешку, где все зависит от «оптики зрения»? Т.е. технологическая операция по роду своему есть тоже технология, поскольку это физический процесс, состоящий из других физических процессов, которые состоят из ...? ТО (технологическая операция) как раз есть атом, предел деления технологии. Мы предлагаем **критерий дискретности формы** при детерминации ТО. Хотя и он не свободен от недостатков, его легко понять на примере микроэлектроники, когда рисуется последовательность сечений (сверху или латеральных) структуры фрагмента микросхемы, поясняющая технологический маршрут (или его фрагмент): обычно удаляются или добавляются слои, вырезаются контактные окна (после литографий) и т.д. Отличающий ТО от физического процесса признак – это дискретность перехода формы. Аналогичное понятие, родившееся в информационных (например, банковских) технологиях – транзакция. В прежних работах мы брали за основу другой критерий: совершение операций под контролем одной единицы оборудования. Сформулированные критерии, разумеется, не догма и могут корректироваться по мере развития ОТТ. К ним можно добавить дополнительный критерий сложности. Технология сложна, а операция проста; и продолжим – с точки зрения их внутренней структуры. Более того, если обратиться к феномену рождения технологий, то окажется, по-видимому, что большинство существующих ныне технологий были образованы путем усложнения, дифференциации (физических) процессов одной прототипной ТО. Тогда можно говорить о латентной или предтехнологической стадии генезиса любой технологии.

- Выделение уровней описания технологии соответствует реальности или является умозрительной конструкцией? Ответ неоднозначен. Три первых уровня (ТО, ТМ, ПП) гораздо ближе к своему денотату, чем уровни Т и СТ. Иерархический подход к описанию технологии естественно, хотя и не необходимо, следует из сложности всякой технологии, постулированной в тезисе. Отсюда следует и многоаспектность, свойственная исследова-

нию любой сложной системы. Само научное знание, как общепринято в философии науки, имеет свои уровни. В проектировании микросхем также выделяют уровни, условно 5, но: иногда уровень расщепляют на два подуровня, иногда сливают два в один, а в крайних маргинальных случаях вообще сомневаются в полезности деления.

### ТЕЗИС ТРЕТИЙ: КАЖДЫЙ УРОВЕНЬ ОПИСАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОРОЖДАЕТ СПЕЦИФИЧНЫЕ ДЛЯ НЕГО ПОНЯТИЯ

Мы выделили пять уровней описания технологии (технологической операции – ТО, технологического маршрута – ТМ, производственного процесса – ПП, технологии – Т, суммы технологий – СТ) и высказались в пользу существования шестого, последнего уровня. Само название уровня претендует на новизну понятия и его несводимость к ранее известным понятиям. При движении снизу вверх, от ТО до ПТ, естественно «нанизывать» горизонтальные сети понятий (концептов) на узловой концепт – это определит логику развертывания ОТТ в последующих частях статьи. Некоторые концепты будут наследоваться или легко переопределяться по аналогии из нижележащих уровней, другие же будут, напротив, оригинальными, говоря языком теории систем, эмерджентными. Поэтому назовем данный тезис положением **эмерджентности**.

Базовыми предтехнологическими понятиями являются **процесс** и **преобразование**. Позже дадим их формализации. Второе понятие более узкое и в технологической семантике расходится с математическим смыслом ( $f:A \rightarrow A$ ), поскольку неявно полагается изменение структуры объекта. Примером эмерджентного понятия является **технологическая среда** ( $T_c$ , technological ambient), которую имплицитно можно ввести уже на уровне ТО, но наиболее ярко оно проявляется на уровне ПП, исчезая на высших уровнях. В микроэлектронике элементом технологической среды является «чистая комната», призванная защитить от действия неконтролируемых факторов (пыли) оснастку и пластину. Еще одним примером  $T_c$  может служить сравнительно недавнее по времени огораживание железнодорожного полотна забором (от животных, детей) в транспортных технологиях РЖД. В биохимии клетки принято говорить о феномене компартиментализации, которая с точки зрения ОТТ видится способом создания контролируемой  $T_c$ . На примере  $T_c$  убеждаемся, что строгая демаркация понятий по уровням не всегда возможна.

С другой стороны выбор уровня описания одновременно выделяет и аспекты, хотя эта связь нестрогая. На уровне ТО нам важен аспект «процесса», и соответственно конструируемые нами понятия будут выражать именно динамический характер, а значит, например, обращение к аппарату дифференциальных уравнений. На уровне ТМ более важен структурный аспект, а процессный аспект дается через понятие «преобразование». На уровне ПП приобретает важность вероятностный аспект и т. д.

### ТЕЗИС ЧЕТВЕРТЫЙ: ВСЕ ТЕХНОЛОГИИ МОГУТ БЫТЬ КАТАЛОГИЗИРОВАНЫ

В каждой из трех сфер, а именно – техника, клетка (и организм), социум, – чем активнее мы применяем технологический подход, тем больше технологий мы там находим. В пределах одной сферы эти технологии, несмотря на кажущееся многообразие, могут быть сгруппированы, упорядочены и каталогизированы. Задачи классификации и каталогизации сходные, однако, классификация предполагает своим условием наличие критериев, а каталогизация предполагает своей целью полноту описания. Таким образом, имея некий масштаб описания (см. обсуждение тезиса иерархичности), можно построить систему технологий, полностью покрывающую данную сферу и имеющую больше «физическое» содержание, а не только формальное. Каждая найденная технология, согласно данному *тезису каталогизации*, должна попасть в нужный «раздел» каталога, заняв в нем свое место. Вначале нужно определить крупные «отраслевые» деления, затем – более мелкие. Так, например, можно выделить группу технологий «пищевая промышленность», а затем её диверсифицировать на технологии производства сыров, колбас, хлебобулочных изделий и т. д. Такой отраслевой принцип позволит нам свести сотни или тысячи технологий до обозримого числа (10–15) наименований.

Такие попытки есть в экономической и биохимической (и медицинской) науке, они делались стихийно и бессистемно, а их обсуждение и, следовательно, первый шаг к каталогизации будет нами сделан далее. Возможно, задача, т. е. достижение полноты описания, не так обширна и безнадежна, как кажется на первый взгляд.

### ТЕЗИС ПЯТЫЙ: ОТТ НЕ ВЛИЯЕТ НА ТЕХНОЛОГИИ

Данный тезис (*автономности*) заимствован нами у Романенко и дается нами в порядке уточнения. Он навеян старыми рассуждениями о влиянии субъекта

на объект, о предпосылках квантовой механики и т. п. По мере расширения ОТТ и влияния теории на лиц, принимающих решение (ЛПР), этот тезис уже может нарушаться, но пока нет никаких оснований считать неверным это классическое для науки Нового времени методологическое положение.

Если ученые смогут создать искусственную биологическую клетку, например, шестью нуклеиновыми основаниями вместо 4-х, тогда можно будет говорить о влиянии ОТТ при проектировании такой клетки. В настоящее время развитие технологий представляется автономным и в некотором смысле естественным процессом, ЛПР следуют своим когнитивным шаблонам, усвоенным ими экономическим теориям или волевому субъективизму, а не каким-то положениям ОТТ (много ли дал системный анализ для реальных решений? всегда ли научные рекомендации востребованы чиновниками из министерств и превосмогают меркантильные соображения?). Тот же аргумент применим и для социальных технологий.

### ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ПРОЦЕССОВ. ПОЯСНИТЕЛЬНЫЕ ПРИМЕРЫ

Из многообразия процессов нужно выделить технологические, т. е. необходима методика исследования на технологичность. Мы постулируем, что для всякой технологии обнаружимы по крайней мере четыре уровня (5-й и 6-й уровни, по сути, надтехнологические). Таким образом, к кандидату на технологию нужно задать по меньшей мере 4 вопроса – по вопросу на уровень. Сформулируем их:

1. ТО → для протекания процесса нужна ли особая среда или оборудование? (Руки человека могут считаться таковым)? Где зафиксированы технологические знания?
2. ТМ → каково конечное изделие? Какова сложность цепочки, ведущей к нему? Выпускаются ли они массово?
3. ПП → существуют ли диверсификация изделий?
4. Т → распространены ли пространственно (географически/юридически) производители таких изделий?

Итак, всякий ли процесс или методика является технологией? Приведем примеры.

**Трафарет.** В недавнем прошлом, а иногда и в наш компьютерный век, ситуативно приходится делать плакаты с надписями с помощью трафарета. Уместно заметить, что применяемая ранее в микроэлектронике контактная фотолитография есть далекий наследник принципа трафарета (история способов переноса изображения нами рассма-



тривалась в [11]). Однако здесь будет идти речь не о принципе трафарета, а о его реализации для плакатов. Сам трафарет является оборудованием для этого процесса, и на 1-й вопрос отвечаем условно «да». Чертить можно во дворе на асфальте, дома на столе, а в более развитом варианте – на кульмане, что в некотором роде дает нам Тс. Конечное изделие, если мы смотрим с точки зрения ТМ – плакат с надписью (начальный субстрат – лист бумаги, на который возможно нанести краску). Однако нарушается требование сложности, хотя заливка буквы повторяется циклически. Если подходить с точки зрения ТО, затруднительно указать ТМ, которому принадлежит этот процесс; кстати, неявно предполагается, что такая связка, даже в предположении опциональности, процессов близка по времени и пространству, одной логической, и желательно – детерминированной, последовательности недостаточно. Черчение через трафарет нельзя назвать ТО, т.к. нельзя указать ТМ, куда она входит.

Свойство массовости выполняется, т.к. потребность возникает периодически (школьные утренники, различные праздники, дающие повод). А вот свойство сложности (подразумеваем «многостадийность») нет. Ограничены возможности управления, т.к. размер и форма букв фиксированы; «выход» скорее персонализирован, чем диверсифицирован, и на третий вопрос ответ скорее «нет», чем «да». На 4-й вопрос ответ «да», т.к. тысячи людей во всем мире сталкивались с черчением плаката. По мере усложнения черчения через трафарет (трафарет уступит место лазерному принтеру, появятся специальные фирмы, делающие такую полиграфию) этот процесс может приобрести ранг ТМ.

Другим, более банальным примером на эту тему служит стрижка ногтей. Читатель может легко сообразить, почему её нельзя назвать ТО (т.к. нельзя указать ТМ, куда она входит). Выскажем гипотезу о существовании методик, имеющих ввиду неразвитости и простоты статус *предтехнологических*. Таким образом, не всякая существующая методика является технологической, т.е. образует ТО или фрагмент ТМ какой-либо технологии.

Таким образом, первый же попавшийся пример из области экономики показал, что она не исчерпывается технологиями, что наряду с «большими» технологиями сосуществуют небольшие процессы-методики. Отсюда следует ограничивающее для ОТТ положение – *технологический подход не обладает полной описания сферы применения*.

Напомним, по Эллюлю, «технология – совокупность рационально выработанных методик, обла-

дающих (на данной стадии развития) абсолютной эффективностью в каждой области человеческой деятельности» [4, 5]. Это не исключает наличия изолированных регулярных процессов, делающих их де факто овеществленными методиками. Возможно, не лишено филогенетического значения образное представление о технологиях как об островах, плавающих в море методик, или как о результате самоорганизации близких по смыслу методик (похожее представление дается в работах по происхождению жизни, например, по теории гиперциклов Манфреда Эйгена).

**Парикмахерское дело.** По сравнению с предыдущим примером уже выполняются свойства диверсификации (есть много причесок), сложности (у парикмахера есть алгоритм работы), наличия Тс (замкнутое помещение необходимо, т.к. ветер служит помехой для телеологии процесса). При этом парикмахерское дело довольно автономно; формально его можно отнести к технологиям визажизма, но ведь различные услуги салонов красоты не облигатны по отношению друг к другу. А ведь мы полагаем, то хронологически ТО внутри ТМ следуют в обычно фиксированном порядке и лимитом времени последовательности. Поэтому парикмахерское дело есть технология, а визажизм ей еще не стал (и возможно, не станет), будучи просто названием группы схожих технологий.

**Термоядерный синтез в звездах.** Пример содержит в себе курьезность, т.к. нетривиально доказать нетехнологичность этого процесса (особенно если учесть, что естественные клеточные биохимические процессы мы посчитали технологическими). Сама звезда является условием высоких температур и давлений, т.е. сама по себе Тс, а ответ на 1-й вопрос «да». Конечным изделием, если стоять на религиозной парадигме, служат атомы тяжелых элементов. Никто из людей звезды не зажигал, но сторонники сильного антропного принципа считают, что Бог использовал звезды для получения из водорода углерода, кислорода, серы и азота, чтобы могли сформироваться планеты, а на них потом – жизнь. Свет, кстати, тоже не может считаться нецелевым отходом, т.к. нужен для жизни. Образование химических элементов проходит непрерывно, хотя и различно в жизненном цикле звезды, т.е. свойство массовости выполнено. Ядерных реакций тоже много, и в некотором смысле многостадийность тоже есть. Поэтому, как ни странно, то на 2-й вопрос ответ «да». Очевидно, и на 3-й, 4-й вопросы ответ так же «да». Тогда почему же это не технология?

Мы забыли момент управляемости или адаптивности. Управляемость в самом простом варианте – возможность прекратить процесс. Можно прекратить выпуск танков и переориентировать производство на выпуск кастрюль. В физиологии организм может прекратить синтез и выброс адреналина, если ситуация перестала быть опасной. В социальной сфере университет может пойти на увольнение сотрудников, если какие-то специальности перестанут быть нужными рынку. Во всех трех случаях прекращение производства, хотя и непростое, имеющее длительность, событие, но оно возможное. Но люди неспособны вмешиваться в горение звезд, а случаев такого вмешательства со стороны Бога не зафиксировано. Когда Уголев определял технологию как совокупность организованных процессов, он как раз и имел в виду под организованностью адаптивность (например, управление через обратные связи). Нарушение этой организованности хотя бы в одном процессе (ТО) ведет к патологии (в биологии), к браку (в технике), к преступлениям (в социальной сфере). Кроме того, неясно, что служит носителем технэ. Самопроизвольность процессов не является показанием против технологичности, однако, трудно представить ТМ, целиком состоящий из самопроизвольных ТО. Нужно, конечно, отметить экстравагантность примера.

**Написание научных статей, сотворение объектов искусства.** Примером могут служить различные издания типа «как правильно писать диссертацию?». С одной стороны творчество, а значит, конечный продукт не определен, но с другой – ученых, композиторов, скульпторов, литераторов (литературных негров?) много, а продукт их деятельности подпадает под шаблоны неизбежно. Принципиальная статья или гениальный романс могут рождаться вполне по обычной технологии, и наоборот. Если отвлечься от высокого искусства и науки, и рассматривать массовую культуру и массовую науку («кирпичикового типа», по выражению Бехтеревой), то уже выработаны шаблоны стиля и предпочитаемые структуры статей, т. е. сформулированы явно или неявно требования к конечному изделию. Массовость и стандартизация каких-то процессов являются сильными косвенными признаками, что мы имеем дело с технологией. В данном случае, по-видимому, в сфере все-таки промышленности (хотя, по признаку волевого усилия можно увидеть здесь социальную технологию) и относящейся к информационным, где материальный носитель имеет второстепенное значение, а затраты могут быть вполне материальными. Легко видеть, что все четыре вопроса реша-

ются положительно. Отметим же хотелось бы, что в этих технологиях лучше всего выражен аспект затрат «энергии» и наличия отходов. Содержательным утверждением помимо пяти тезисов, имеющих формально-методологическое значение, является следующее: *Не существует безотходных и беззатратных технологий.*

Это утверждение вполне тривиально для техники и физиологии [10], но может быть расширено на социальную сферу и на информационные технологии. Даже в технологии, где целевым продуктом является информация, тратится материя (бумага, место на жестком диске, не говоря уже о кусках камня, потраченных скульптором на неудачные варианты), энергия и воля (психическая энергия). Вот, например, я четко знаю, что после написания этой статьи у меня на винчестере останется папка со скаченными в Сети литературными источниками, а в голове (статус которой – оборудование) – какие-то неясные ассоциации, не вошедшие в текст статьи. У другого ученого может быть по-другому, т. к. он может следовать другому технологическому маршруту, адаптированному к его особенностям (известно, что Аристотелю лучше думалось, когда он прогуливался по парку, а вот Платону, возможно, лучше думалось в положении лежа). Несмотря на вариации, отходы технологии (творческой) неизбежны. Что касается затрат, они очевидны для материальных технологий, менее очевидны для информационных. Пример «усталости оборудования»: искусствоведы давно обнаружили, что все симфонии Бетховена с четными номерами слабее симфоний с нечетными номерами. Надо полагать, что «четные» симфонии композитор сочинял при исчерпанном запасе психической энергии.

**Проблемы фармакологии:** доставка капсул с лекарством через желудочно-кишечный тракт. Вопрос не о технологичности процесса, а как могут быть использованы естественные технологии на благо человека. В данном случае проблема лежит на пограничье физиологии и медицины, а чтобы предсказать структуру капсул и оптимизировать структуру лекарственной формы необходимо знать детали пищеварительного процесса, технологию которого используют. Такая проблема возникает при разработке таблетизированных форм инсулина. Несколько различная проблема возникает при приеме антибиотиков, где уже сами естественные технологии испытывают на себе влияние промышленной (в данном случае – фармакологической) технологии. Еще можно упомянуть о проникновении лекарств через гематоэнцефалический барьер.

Итак, при попытке определить какие-то процессы как технологические мы столкнулись с сопутствующими технологиями признаками (помимо отмеченных выше 4-х признаков):

- связанность (целокупность) процессов в пространстве и времени, при этом они получают статус ТО (логическая связь желательна, но необязательна);
- регулируемость (организованность, адаптивность);
- массовость, которую не нужно путать с часто встречающимся групповым свойством ТО и которая понимается в трех вариантах: а) во времени – существует структура, обеспечивающая Тс и регулярный выпуск целевых изделий – если методика применяется одноразово, то это не технология; б) в пространстве – производственные процессы мультиплицированы в мире (например, кремниевых фабрик в мире довольно много) – контрпример: создание атомных бомб в странах мира можно назвать методикой, но не технологией; в) номенклатуре – технология не может производить только один тип изделия, а диверсификация изделий есть, по-видимому, условие выживания технологии в мире;
- наличие как целевых, так и нецелевых продуктов.

Сделаем еще замечание о транспортной технологии. Конечное изделие все-таки присутствует. При перевозке, например, бананов из Эфиопии в Москву изделием выступают бананы с предикатами «быть в Москве» и «быть пригодным к употреблению». Можно вспомнить о перевозке хрупких предметов или людей; работники РЖД должны обеспечить Тс, где бы человек не замерз ночью.

## СРЕДСТВА ФОРМАЛИЗАЦИИ

К настоящему времени наработано множество формально-графических средств, служащих для выражения связей между понятиями (концептами) теории. В базах данных это ER-диаграммы «сущность – связь», в гуманитарных областях более слабые формализмы типа диаграмм Исикавы (1943), а в программировании (и CASE-технологиях) – унифицированный язык моделирования UML, развиваемый с 1992 года и вобравший в себя почти все предшествующие разработки. Не забудем также стандарты семейства IDEF, прежде всего стандарт IDEF3, как раз посвященный описанию промышленного производства.

В каждом конкретном случае диаграмма Исикавы (fishbone) [11] будет выглядеть по-разному, но можно назвать типичные группы влияющих факторов. Например, в соответствии принципом «6M's + E» (свое название принцип получил по пер-

вым буквам соответствующих английских слов), основные влияющие факторы можно разделить на несколько групп: *Man, Machine, Method, Materials, Measurement, Management Environment*. Хотя метод применяется с целью выявления причин при обнаружении проблемы, его второе название (Cause-and-Effect-Diagram) говорит о большей области применения. Даются такие оценки [12]: «В учебниках по менеджменту качества примеры диаграмм редко состоят больше чем из 10–15 ветвей, однако при решении реальных задач это число значительно возрастает. Так в публикации, рассматривающей причины отказов в устройствах электроники, диаграмма Исикавы включает 89 ветвей: 4 – первого уровня, 12 – второго, 47 – третьего и 26 четвертого уровня. Другая публикация, дающая анализ проблемы с замороженным исходным сырьем при производстве консервированных осьминогов, включает 68 ветвей: 6 – первого уровня, 24 – второго, 27 – третьего, 11 – четвертого». К достоинствам техники диаграмм относится ранжирование причин по степени их важности, а к недостаткам – отсутствие временной оси, хотя она как будто вытекает из графического начертания диаграммы. При графической экспликации ОТТ техника диаграмм Исикавы, по нашему мнению, может быть полезной.

За основу языка выражения ОТТ мы возьмем технику концептуальных методов С. П. Никанорова, тесно связанную на теорию родов структур Николая Бурбаки (1965). Хотя выражения родоструктурных схем подчас громоздки и тяжеловаты для практического использования, но они сохраняют преемственность с фундаментом математики и, без сомнения, позволяют обеспечить логическую стройность и непротиворечивость создаваемых конструкций. Указанная техника зародилась в 80-х годах XX в. в Госплане СССР и сейчас развивается на кафедре концептуального анализа и проектирования ФИВТ МФТИ, а также Павловским Ю. Н.; подробнее она изложена в работах [13–16].

Концептуальная схема (КС) – система взаимосвязанных понятий, необходимая и достаточная для описания требуемого аспекта объекта. Если аспектов несколько (2–4), то мы говорим о концептуальной модели (КМ). Вопросы, с которыми связано концептуальное исследование, – это «Что такое...?», «Каким образом...?», а не «Сколько...?», «Чему равен...?». Это принципиально отлично от математического моделирования, где число – самое важное. Ключевая роль отводится идее о взаимосвязи предмета, имени и концепта (треугольник Фреге).

Таблица 1. Сравнение родоструктурной экспликации КС и структуры формальной теории (ФТ, по Д. Гильберту)

КС Бурбаки	ФТ Гильберта	Комментарий
Понятие как множество	Алфавит	Если нам нужно что-то определить, то оно определяется как класс. Пример: вместо «дерева» дается все множество «деревьев»
Отношение как структура	Слово	Из первоначальных элементарных понятий создаются производные как структуры алгебраического типа. Можно задать тип: «один-к-одному», «несколько-к-одному» и т.п. Язык теории множеств дает средства: знак $\in$ – булеан, знак $\times$ – декартово произведение. Каждая структура задает класс, а не один элемент
Ограничение как аксиома	Аксиома (или правило)	Тип отношений дается ограничениями. Несколько структур, можно связать их частями. Используются логические связки и операция проекции ( $pr$ )
Терм как производная от структуры – необязательно	Правило вывода – обязательно	Фактически налагаются дополнительные условия, позволяющие выделить из всего класса объекта некоторые, обладающие интересными свойствами; т.е. из рода воссоздаются виды

Часто оказывается, что различные по своей природе объекты в концептуальном плане представляются одними и теми же структурами. Так, например, представление о составе некоторого технического устройства, основанного на отношении «входить в» (одно устройство в состав другого), и описание сети отношений «подчинения» между некоторыми сотрудниками (на абстрактном уровне) могут быть заданы одной и той же структурой – бинарным отношением на одном множестве, которое сопоставляется либо множеству устройств, либо множеству людей. По отношению к обоим объектам эта структура выступает как специфическое познавательное средство, именуемое в концептуальном моделировании конструктом. Идеология концептуализации, конечно, не сводится к формализму аппарата, но именно он нами заимствуется в первую очередь. Сделаем небольшой экскурс в него; математикам в помощь табл. 1.

**Пример:**  $X_1, X_2$  – множества;  $X_1 \times X_2$  – множество, состоящее из всех пар  $(x_1, x_2)$ ,  $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2$ ;  $B(X \times X)$  – множество всевозможных бинарных отношений на множестве  $X$ ;  $D \in B(X \times X)$  – структура, задающая некое бинарное отношение на  $X$ ;  $d \in D \in B(X)$  – просто некоторый элемент из  $X$ ; если  $d \in D \in B(X \times B(Y \times Z))$ , то  $pr_1 d$  – это какой-то элемент  $X$ , а  $pr_2(pr_1 d)$  – какой-то элемент  $Y$ .

Концептуальная схема абстрактного процесса в родоструктурной форме имеет следующий трехчастный вид (термы не вводим):

$X_1$  – множество элементов;  
 $D_1 \in B(B(X_1) \times B(X_1))$ .

Структура  $D_1$  интерпретируется как множество пар: «Множество элементов входа; множество элементов выхода». Таким образом, схема абстрактного процесса задается в виде множества процессов. Постулируются следующие аксиомы:

$Ax_1: \forall d \in D_1 (pr_1 d \neq \emptyset)$ .

Интерпретация: «Множество элементов входа каждого процесса не пусто».

$Ax_2: \forall d \in D_1 (pr_2 d \neq \emptyset)$ .

Интерпретация: «Множество элементов выхода каждого процесса не пусто».

$Ax_3: \forall d \in D_1, \forall p \in D_1 ((pr_1 d = pr_1 p) \Rightarrow (pr_2 d = pr_2 p))$ .

Интерпретация: «Для любого множества элементов входа единственно множество элементов выхода», т.е. процесс детерминирован.

КС «Абстрактный процесс» используется в тех случаях, когда не требуется различение элементов процесса по видам. Существуют задачи, прежде всего технологические, в которых необходимо или полезно среди элементов процесса выделить, например, изменяющиеся и неизменные части. Для таких задач более удобна схема **процессов с ролями**. В КС «Процесс с ролями» выделены отдельно те элементы, которые выполняют процесс (процессор), т.е. переводят вход в выход, и элементы, над которыми этот процесс осуществляется (рабочее вещество). Итак, в родоструктурной форме имеем [17]:

$X_1$  – множество элементов;

$D_1 \in B((B(X_1) \times B(X_1)) \times (B(X_1) \times B(X_1)))$ ;

$Ax_1: \forall d \in D_1 ((pr_1(pr_1d) \vee pr_2(pr_1d) \neq \emptyset) \wedge$   
 $(pr_1(pr_2d) \vee pr_2(pr_2d) \neq \emptyset))$ ;

$Ax_2: \forall d \in D_1, \forall p \in D_1 ((pr_1d = pr_1p) \Rightarrow (pr_2d = pr_2p))$ .

В этой конструкции множество элементов входа (или выхода) трактуется как двукомпонентное – одна относится к субстрату, другая – к оборудованию (процессору). Недостатком этой формализации видится внешнее отсутствие различия процессора от субстрата. В следующей части статьи мы подробнее обсудим отличие процесса от преобразования, а здесь важный пример для ОТТ концептуализации «процесса» дается скорее как иллюстрация. Обычная КС содержит 3–5 исходных понятия (множества), 7–10 родовых структур и порядка 20–30 аксиом.

## ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

По-видимому, существует два принципиальных возражения против того, чтобы считать биохимические процессы, происходящие внутри живой клетки, и физиологические процессы, происходящие в многоклеточном организме, подобными искусственно созданными человеком (промышленным) технологиями. Первое основано на том, что человек, как потребитель, создает её цель и дает смысл производству изделий, а, как участник процесса, является носителем технэ (технологических знаний) и контролирует весь процесс. В биологии клетки, как кажется, все происходит естественно, и никто не определяет никаких целей. Второе возражение, во всяком случае для клеточной биохимии, связано с тем, что в разные моменты включаются и существуют различные метаболические пути превращения ключевых реагентов/продуктов, притом, например, промежуточные вещества могут одновременно участвовать в нескольких путях, много-различных по гипотетическому результату. Иными словами, «овеществленный алгоритм» вовсе не заметен в цитоплазматическом «котле» одновременно протекающих биохимических реакций.

Чтобы снять первое возражение, обратимся к уровню СТ. Устойчивость и воспроизводство во времени системы экономических отношений, поскольку в противном случае они не наблюдались бы исследователями, обусловлено балансом затрат, входом/выходом технологий, т.е. особенностями каждой технологии подчинены её включенности в общий цикл выживания (=наблюдаемости)

системы технологий. Этот баланс легко прослеживаем финансово, хотя иногда возникают любопытные артефакты (пример: футбольные клубы, за редчайшими исключениями, убыточны, есть множество околофутбольных технологий, но голый экономический расчет и недавно введенное ФИФА финансовое фэйр-плэй всегда будут существенно корректироваться политическим расчетом «народу зрелища» или тщеславием владельца клуба). Если приподняться над городской суетой, то обнаруживается цикличность этой суеты, закономерность процессов в «человеческом муравейнике» – в сетевые магазины ежедневно подвозят хлеб, покупатели его регулярно «растаскивают». Сравнение государства с живым организмом давно стало общим местом в монографиях по философии истории (Шпенглер, Тойнби, Гумилев и т.п.). Конечная цель системы биохимических технологий – это выживание клетки, общая цель промышленных технологий – это выживание нации, народного хозяйства. Во втором случае человек нужен постольку, поскольку является частью Мегамшины Мамфорда скорее, чем её смыслом, чтобы нам ни говорил обычный смысл («изделия нужны нам, а не мы им»). И действительно, технологии, вернее наша включенность в них, обеспечивает нас работой и средствами к существованию. Цель выживания СТ есть цель объективная, переходящая на отдельные технологии и задающая их целевые продукты. Метаболит, не участвующий далее в других технологиях живой клетки, бесполезен и вреден, также как и изделие, не обладающее функционалом (его просто не будут покупать). Собственно говоря, экономика знает такие случаи – кризисы перепроизводства, но ведь и физиология тоже знает – скопление жидкости в каком-то органе, «водянка». Поэтому представление об отсутствии целей у биохимических реакций попросту наивное.

Даже в физике частично восстановили «конечные причины»: достаточно вспомнить вариационные принципы механики – траектория тела удовлетворяет достижению минимума действию, которое представляется интегралом от функции Лагранжа или, исторически позже, Гамильтона. В биологии и физиологии даже одобряются рассуждения о функции того или иного органа (подсистемы), *как если бы* он имел цель, чтобы дальше вывести его структуру из выполняемой им функции. Окончательно снимает возражение телеологичности указание, еще со времен Вернадского, на особое термодинамическое состояние, в котором находится вещество в живой клетке. Поэтому «естественные технологии»

весьма далеки от естественности и самопроизвольные, и как давно аргументировано Шредингером, биохимические реакции протекают в направлении повышения порядка. И еще раз, в промышленных технологиях нам только кажется, что мы ставим цели – это до некоторой степени заблуждение. Мы в целом разделяем мнение Эллюля о том, что система технологий развивается независимо от человеческого разума, притом что человек все ближе к состоянию придатка, некоторого промежуточного компонента (как покупатель изделий и как продавец своего труда, см. формулу «товар – деньги – товар») этой системы технологий.

Второе возражение, связанное с контролируемостью и параллельностью протекания процессов, более весомо. Естественные технологии гибче и адаптивнее созданных человеком, здесь совершенно иной уровень контроля, тоньше организованы обратные связи (очень часто, например, для некой химической реакции существует фермент или гормон, ускоряющий или ингибирующий превращение, поэтому сдвигать химическое равновесие можно двумя альтернативными способами, что увеличивает надежность). Благодаря пространственной близости реагентов обратные связи действуют быстрее, а в экономике приходится наблюдать из-за инерционности циклы разной длины (см. работы Шумпетера). В экономике перемещение вещества почти всегда происходит принудительно, а вот в живой клетке часто приходится бороться с диффузионными процессами (натриево-калиевые насосы), характерными для жидкой среды. Разветвленность метаболических путей и нелинейность алгоритма вовсе не означает его отсутствие. В качестве примера рассмотрим результирующее уравнение фотосинтеза  $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ , оно, несмотря на вариации темновой и световой стадий, пути С3 или С4 (т.е. различны ТМ), остается неизменным. Если можно указать начальные реагенты и конечные продукты, то не слишком важно, какими были интермедиаты, мы в состоянии указать примерный алгоритм и соответственно, как он овеществляется. Аналог С3 и С4 фотосинтеза можно усмотреть и области, близкой к микроэлектронике: два метода получения монокристаллического кремния – метод Чохральского и метод зонной плавки. Не подлежит сомнению, что биохимические процессы обладают специфичностью по сравнению, например, с химической технологией. Эта специфичность заключается прежде всего в изолированных способах контроля, но трактуется нами как видовая, а не родовая. Обычно мы привыкли, что

целевое изделие получается в конце технологического маршрута, однако, биохимия учит нас тому, что целевые изделия многочисленны и рождаются в ходе циклов, которые не имеет четко выраженного окончания. Однако даже естественные технологии не свободны от отходов; в случае клетки конкретика не столь очевидна, как в физиологии.

Какие же аргументы Pro для родового единства естественных и искусственных технологий? Многочисленные аналогии. От неслучайного крылатого утверждения «железные дороги – кровеносные артерии страны» до множества органелл, плавающих в цитоплазме и весьма напоминающих мини-фабрики, «дома», где создается Тс. Многие реакции, в основном анаболические, требуют энергетического сопряжения с типовыми реакциями типа АТФ → АДФ, и в этом смысле «искусственны», идут с затратой энергии, как и большинство технологических операций, часто требующих подогрева смеси или механических затрат на перемещение компонентов (сборочное производство). Ферментативная реакция весьма напоминает «процесс ролями», где сложно устроенный фермент играет роль оборудования. Сложность устройства митохондрий действительно делает сравнение с энергетической станцией клетки ярким. Конечно, апелляция к бионике и сравнению форм изделий еще недостаточна для признания сходства двух технологий, тем не менее, кибернетических аналогий достаточно.

Можно вспомнить принцип органопроекции Э. Каппа [18] и его работу «Основы философии техники» (1877) – «возникающее между орудиями и органами человека внутреннее, хотя и является скорее бессознательным открытием, чем сознательным изобретением, – заключается в том, что в орудии человек систематически воспроизводит себя самого». Так, телеграф он считал внешней формой и продолжением нервной системы. Капп даже и государство рассматривает как внешнее расширение духовной жизни (см. далее о технологиях в сфере социума). Но, конечно, не следует искать субъективное начало, названное Каппом органопроекцией, в биологических и технических аналогиях. По нашему мнению, эти аналогии имеют объективное глубинное общетехнологическое основание.

Еще один аргумент Pro возникает, если учесть свойство массовости, одно из центральных при оценке технологичности процесса. Другая сторона медали связана с изобретением технологии. Согласно Википедии, «С4-фотосинтез независимо возникал по крайней мере 65 раз в 19 различных семействах, и являет собой непревзойденный при-

мер конвергентной эволюции». В истории человечества повторные изобретения тоже случались, хотя и не 65 раз: примером может служить паровая машина Герона Александрийского, изобретенная в I в. н.э., но забытая, и паровой двигатель, заново изобретенный Ньюкоменом (до Уатта) в XVIII в. Оба изобретения были довольно важны в соответствующих сферах, но, очевидно, в аспекте ре-изобретения искусственные технологии эффективнее естественных.

Говоря о машине Уатта, мы не забываем о её сложности и способах её подстройки, также как и про структуры растительной клетки, ответственные за фотосинтез. Для их создания нужен определенный уровень технологии, точнее даже – уровень воспроизводства функциональных блоков (см. концепцию Уголева об универсальных блоках). В проектировании микросхем весьма похожая ситуация возникает со сложными функциональными блоками (СФ-блоки или IP-cores), но она скорее относится к технике, а не технологии. Примерами технологических элементарных блоков служат: крепеж деталей вида «болт – шайба – гайка», использование условных графических обозначений (т.н. УГО) на принципиальных электрических схемах, метилирование фрагмента нуклеиновой кислоты, использование явления осмоса в физиологии, выдача домашнего задания в обучающих технологиях.

## КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ ТЕХНОЛОГИЙ

**Первейший** признак классификации, на наш взгляд – сфера применения, происхождение. Соответственно вслед за другими авторами мы придерживаемся такой классификации:

1. естественные, т.е. созданные природой, и дифференцируемые нами четко на клеточные и организменные;
2. искусственные, т.е. созданные человеком;
3. смешанные, т.е. порожденные переплетением естественных и искусственных (биотехнологии, сельскохозяйственные);
4. социальные, т.е. созданные обществом (воспитание, пропаганда) и направленные на трансформацию самого человека.

Первая группа относится к сфере биологии, вторая – к сфере техники, третью группу можно присоединить ко второй, поскольку биохимические процессы носят утилитарно-технический характер, а четвертая группа сосредоточена только в обществе и его структурах, в частности, политических. Мы постулируем, что каждая из трех сфер накладывает

видовую специфичность на форму и содержание технологии, именно поэтому данный признак наиболее приоритетный. Сделаем одно методическое замечание – при выборе остальных классификационных критериев необходимо формулировать их так, чтобы они имели действие во всех трех сферах применения одновременно.

**Второй** классификационный критерий тесно связан с характером и целью преобразования, согласно которому можно выделить технологии:

1. материальные;
2. энергетические;
3. (ин)формационные;
4. транспортные.

Технологии первого типа преобладают и отражают классический вариант, когда изделие будет использоваться по функциональному назначению и важно его материальное воплощение: лопата, обувь, кремниевый чип (техника), гемоглобин (биология), знания физики у конкретного старшеклассника (социум). Сюда же относится разработка прикладных программ, несмотря на их «нематериальность» и привычную ассоциацию «информационными технологиями». Для социальных технологий роль материи играют знания и навыки, лежащие в основе способности человека что-то сделать. Технологии второго типа ставят целью получение энергии и, как правило, материальный носитель, где она аккумулирована (нефть, батарейка, АТФ), достаточно стандартизован. Что касается социальных энергетических технологий, то примерами можно считать патриотическое воспитание, какие-то воодушевляющие мероприятия (допустим, тренинги гербалайф), все то, что влияет на волю и заставляет человека реализовывать знания, планы, идеи (без этого получается «маниловщина»). Технологии третьего типа имеют целью извлечение/создание и «впечатывание» информации, где роль материального носителя второстепенна. Проектирование микросхем, изготовление фотошаблонов относятся к этому типу. Медицинско-диагностические процедуры, включая разные профилактические осмотры, любая аналитическая деятельность (например, шпионская или научная) подпадают под эту категорию. Суперкомпьютерные [19] и вычислительные технологии требуют материальных затрат, дорогостоящего оборудования, но их изделие – это информация (и опять повторяем: сама материя вторична). Соответствующие примеры из биологии: транскрипция ДНК в м-РНК (хотя, благодаря химизму, материальный носитель немаловажен), работа нервной системы.

Для социальных технологий третий тип лучше назвать формационным, когда в сознание человека внедряются скорее не знания, прежде всего инструментальные, или навыки, а идеи и ценности. Здесь аналог энергии есть мотивация/воля, а аналог информации – содержание ценностей. Если идея, или «мем», признан обществом полезным, то его нужно, во-первых, довести до сведения человека, а во-вторых, постараться «впечатать» мем, и желательно без искажения, в психику человека. Интересно, что слово «мем» или «мим» придумал в 1976 году популяризатор биологии Р. Докинз [20], проводя аналогию с генами. Человек в данном случае выступает (пассивным) носителем мема, задача формационной технологии – «впечатать» мем в его сознание; поэтому формационные технологии тождественны когнитивным (как их сейчас понимают, [21]). К ним близка пропаганда. По Эллюлю [4], «всякая современная пропаганда одновременно адресована и индивиду, и массам. Обе эти составляющие в ней неразличимы. Адресовать себя индивиду, изолированному и отделенному от толпы, для пропаганды невозможно. Сам по себе он не представляет интереса для пропагандиста; как изолированная единица индивид оказывает слишком большое сопротивление внешнему воздействию. Чтобы быть эффективной, пропаганда не может увлекаться частностями». Пропаганда часто воздействует на подсознание, да и когнитивные процессы происходят на уровне «подкорки».

Целью технологий четвертого типа является не преобразование субстрата, а его (или ресурсов) перемещение в пространстве к месту использования, прежде всего – другой технологией. Транспортные вопросы внутри Тс вряд ли следует причислять к ведению транспортных технологий; для микроэлектроники они, тем не менее, важны – загрузка пластин в реактор, перемещение в СМДФ-контейнерах с тенденцией полного исключения человека в т.н. технологических кластерах, доставка деионизованной воды и т.п. В сфере техники, очевидно, это транспорт, в сфере биологии – мембранный транспорт, кровообращение. Например, перенос кислорода, который для организма в чистом виде яд, с помощью инкапсуляции в молекулу гемоглобина. Также в сфере техники – телевидение, масс-медийные технологии (в несвязанной с созданием контента части). Для социальных технологий идеи, ценности, мемы должны быть вначале донесены до человека, а потом уже «впечатаны». Исторически возникший метод семинаров/вебинаров, конференций, творческих вечеров лежит где-то

около социальных транспортных технологий, которые, как оказывается, переплетены с техническими транспортными технологиями, равно как и с образовательными технологиями, решающими сразу три задачи – дать человеку знания, донести до него исторический опыт, сформировать компетенции и «правильные» представления. Обслуживание читателей библиотеками (технология библиотечного дела) – пусть и устаревший, но довольно хороший пример социальной транспортной технологии. Более современный пример: технология издательского дела, как будто бы относящаяся к обычным материально-техническим (искусственным), но одновременно социальным транспортным. Очевидно, эта технология обладает массовостью, сложность и отвечает всем дефинитивным признакам (изделие: книга, периодический научно-технический журнал – как носители информации; например, на уровне ПП выделяются издательства Springer, МАИК, Техносфера и т.д.).

Если присмотреться к этой классификации, то становится ясным глубинный смысл – технологии создают необходимые условия для существования других технологий (начиная с уровня ТО). Если встать на эту точку зрения – условий ТО, то по крайней мере материальные технологии претерпят следующее деление:

1. добывающие, или субстрат-формирующие;
2. строительные, или формирующие технологическую среду;
3. машиностроительные, формирующие процессор (оборудование) в ТО;
4. утилитарно-функциональные, формирующие конечные изделия, которые будут использованы во многих технологиях и методиках.

Подчеркнем, эти названия, хотя и взяты из промышленных технологий, имеют расширенную семантику для всех трех сфер. По поводу «добывающих» технологий Романенко справедливо писал: «Шкуру животного первобытные люди непосредственно не использовали». Действительно, откуда технология берет исходное вещество (субстрат)? Промышленные технологии черпают ресурсы из природной среды (горные породы для производства кремния), естественные технологии также из природы или других живых существ, а социальные технологии, вероятно, из устных преданий (обобщая – из разговорной среды), письменных сообщений и книг. Мы выделили отдельно строительные технологии; если их рассматривать узко, в экономической сфере, то может возникнуть недоумение, почему на них акцентируем внимание?



Но если посмотреть биологию, то внутриклеточные мембраны (например, аппарат Гольджи) и разнообразные органеллы типа рибосом, лизосом и митохондрий, каждая из которых является вариантом Тс, дают веское основание для этого. Для социальных строительных технологий, вероятно, значимо существование различных организаций, например, профсоюзов или обществ любителей собак. Проектирование организаций и консалтинговые услуги – это важная компонента экономического развития, развиваемая и на практике и в теории, в частности, школой С. П. Никанорова. Хорошим визуальным способом определения, какие же технологии есть в той или иной сфере, служит учет всех «строений»; особенно важно это для выделения биохимических технологий. Аналог машиностроительных технологий в биохимии – это синтез ферментов, а в физиологии, по-видимому, образование специфической ткани, например, мышечной. Утилитарно-функциональные технологии формируют в основном т.н. «расходные материалы» или будущие стандартизованные компоненты оборудования. Кремниевый чип, например, войдет в состав какого-либо представителя радиоэлектронной аппаратуры. Другие примеры: ножницы, брелки, скрепки, тарелки (техника), джинсы; сахара, эфиры, жиры (биохимия); представления о матрицах, путешествиях/командировках, паспорте (социум), дресс-коде.

**Третий** классификационный критерий, вводимый нами, относится к направлению преобразования структуры субстрата и близок к понятию энтропии. Большинство технологий идут в сторону понижения энтропии изделия (по сравнению с субстратом или субстратами), и действительно, функциональность изделия обеспечивается его второй формой, т.е. дополнительной упорядоченностью. Однако возможны технологии, повышающие энтропию – в области техники мы, пожалуй, еще не доросли до таких (переработка мусора), а области биологии таких примеров много (пережевывание пищи, распад белка до аминокислот и далее до соединений аммиака и мочевины). Как мы полагаем, характер преобразования накладывает свой отпечаток на всю технологию. Таким образом, мы выделяем следующие группы:

1. создающие, т.е. когда сложность изделия выше сложности субстратов;
2. разрушающие, т.е. уменьшающие упорядоченность структуры;
3. унифицирующие, т.е. путем небольшой модификации приводящие структуру субстратов к одному

шаблону (приведение стволов деревьев к пиломатериалам, ЕГЭ, «прокрустово ложе»).

4. фильтрующе-сортирующие, разделяющие потоки субстратов в соответствии с их структурой без их модификации (физиология почек, разделение для утилизации мусора).

В некоторой степени этот признак коррелирует с технологической телеологичностью, поскольку добывающие технологии, как правило, унифицирующие и фильтрующие, а остальные два типа с необходимостью создающие (т.к. функциональность проистекает из негэнтропийности); утилитарно-функциональные технологии по большинству создающие, но среди них возможны и разрушающие.

Второй критерий вместе с подкритерием для материальных технологий и третий критерий имеют общее начало в направлении преобразования субстрата, то есть внешней и внутренней телеологичности, совместно выраженных во второй форме. Четвертый и пятый критерии относятся к организационным, в терминах Романенко, отражая логическую и пространственно-временную сущность технологического маршрута или производственного процесса.

**Четвертый** критерий, имеющий дело со структурой технологических потоков (у Романенко это понятие одно из центральных), влечет за собой три параллельные дихотомии. По степени фиксации ТО внутри ТМ технологии делятся на:

1. жесткие, т.е. последовательность ТО детерминирована и неизменяема (такова микроэлектроника);
2. мягкие, т.е. существует вариативность путей достижения целевых продуктов (иногда авторы математических книг указывают, в каком порядке можно читать главы – например, пропустить 2-ю главу и перейти сразу к 6-й).

По месту появления целевых продуктов технологии делятся на:

1. конечные, т.е. целевой (конечный) продукт является конечным, возникая в конце ТМ, а не в его ходе. Такова микроэлектроника, а вот наша система высшего образования перестает быть таковой: три ступени «бакалавриат – магистратура – аспирантура» предполагают и три варианта изделия, появляющиеся в ходе единого ТМ. Обычно конечная технология предполагает монопродукцию, т.е. одно целевое изделие, но, возможно, есть исключения;
2. циклические, т.е. выпускается несколько типов изделий в процессе всего ТМ. Название дано

по аналогии со множеством биохимических циклов, однако допускается, что маршрут не является замкнутым. Примером из области техники может служить разработка новых и новых версий одной и той же программы, из области социума – ежегодный цикл церковных чтений Писания, формирующих жизнь воцерковленного человека (религиоведы выделяют несколько степеней верования, т.е. несколько типов «изделий»). Мы допускаем, что при более строгом подходе отождествление «концевой ↔ монопродукция» и «циклический ↔ полипродукция» окажется не вполне корректным.

По количеству потоков субстратов или полуфабрикатов мы делим технологии на:

1. линейные;
2. разветвленные, делящиеся на сборочные и персонализированные.

Технология микроэлектроники линейная, т.к. в ней все операции осуществляются над пластиной, и один субстрат претерпевает всю последовательность модификаций. Небольшим исключением является операция бондирования микромеханики, когда, например, для формирования микрополостей, требуется сочленение двух пластин. Однако, например, при производстве мороженого нельзя выделить единственный субстрат: вафельный стаканчик и сама молочная масса равноценны как два субстрата. Ситуация сборочного производства предполагает несколько потоков субстрата, поэтому это разветвленная технология. Иногда есть общий один поток субстрата, который, подобно дельте реки, расщепляется на несколько в самом конце ТМ. Это происходит при персонализации. Похожая ситуация происходит при изготовлении изделий на основе базового матричного кристалла, когда металлизация и разводка топологии, играющая ключевую роль, формируется ближе к концу ТМ. На этих примерах видно, что указанные три дихотомии допускают промежуточные варианты.

**Пятый** критерий связан с пространственно-временными особенностями организации процессов и также влечет за собой три дихотомии. По характеру проявленности технологии, обычно на уровне ПП, она бывает:

1. перманентной, т.е. объективированной (активной) с течением длительного по сравнению с характерной длительностью ТМ времени, имеет свою историю – большинство технологий принадлежат этому классу. Пример из физиологии – кровообращение;

2. ситуативной, т.е. технология может реализовываться в двух режимах – активном и пассивном (вплоть до «анабиоза»). Например, технология деления клетки реализуется лишь в момент её деления; можно вспомнить суточные ритмы у животных. Примером из области техники служит развертывание сил МЧС при ликвидации пожаров (летних, торфяных и т.п.) или наводнений. Аналог у Романенко – периодические технологии.

По проявленности технологии на уровне ТМ и ТО во времени (можно предположить, что особенности ТМ наследуются в данном случае из особенностей ТО) она бывает:

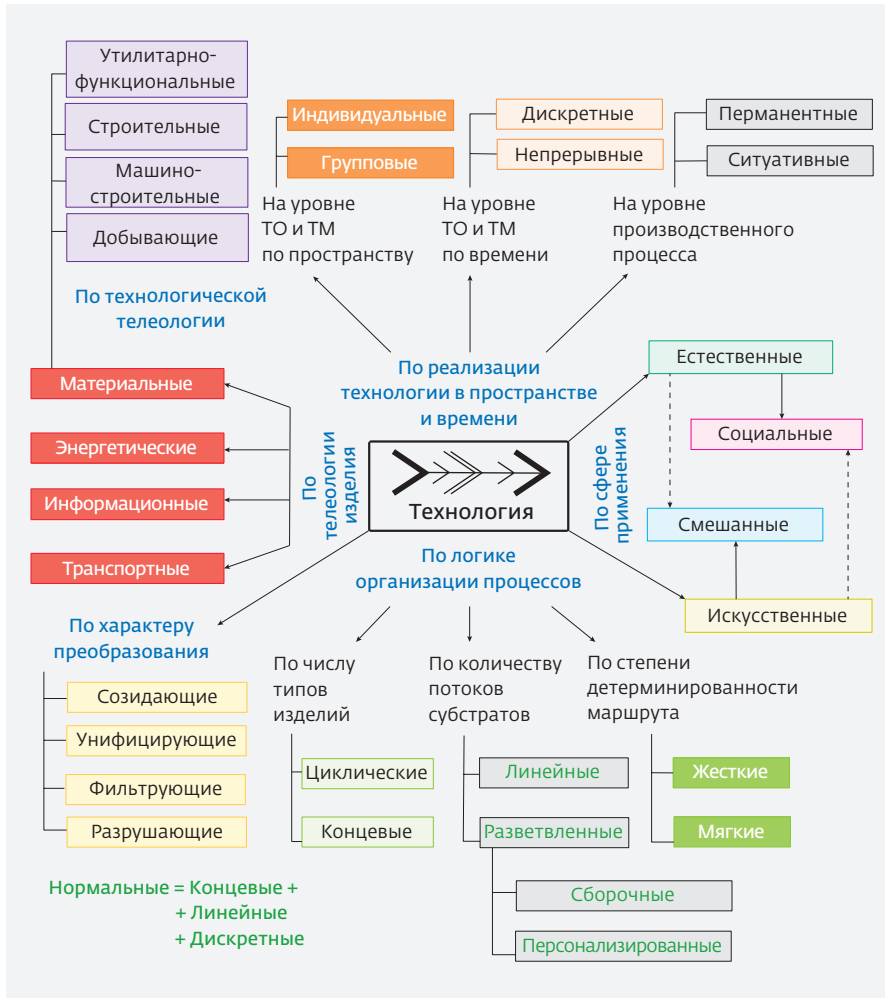
1. дискретной, что характерно для большинства промышленных технологий. На этом вопросе акцентировал внимание Булатов через понятие минимальной порции вещества и технологического атома. В дискретных технологиях ТО обязательно имеет прерывность и длительность; конвейерные технологии, напротив, могут трактоваться через непрерывный поток продукции (примеры Романенко: розлив молока в бутылки, выплавка стали);
2. непрерывной.

На наш взгляд, между непрерывными и дискретными производствами существует резкое отличие, но даже в непрерывную технологию могут влетать элементы дискретности (через порционность), и наоборот. Микроэлектроника, очевидно, дискретная технология. Введем полезное определение: технология называется **нормальной**, если она концевая, линейная и дискретная.

По проявленности технологии на уровне ТМ и ТО в пространстве можно выделить технологии:

1. групповые, т.е. большинство ТО из ТМ применяются одномоментно сразу к нескольким субстратам/полуфабрикатам (микроэлектроника дает классический пример обработки партии пластин, что характерно и для образовательных технологий; групповой способ есть прямое следствие экономии материалов, энергии и времени);
2. индивидуальные, т.е. ТО применяется только к одному субстрату (перевозка пассажира такси, гувернеры в старину, пошив одежды). Чем большие требования предъявляются к точности операций, сложности изделия, тем больше технология тяготеет к индивидуальной.

Мы видим достоинство предлагаемой пятикритериальной классификации в том, что она вытекает естественно из нашего представления о техно-



**Рис. 1.** Объединенная классификация технологий. В центре схемы показан вводимый авторами символ технологии в виде стилизованной рыбы-стрелы, где: хвост отвечает субстрату, голова – изделию, а четыре плавника – факторам производства в виде материи, энергии, информации (технэ) и окружения

логии (и присоединенных к ней абстрактных понятий изделия, формы и субстрата). Структура ТО и СТ, как оказывается, обнаруживает сходство – см. типизацию материальных технологий; мы ограничили действие критерия технологической технологичности только ими, но, возможно, стоит расширить его на энергетические, информационные и даже, быть может, транспортные технологии.

Теперь от задачи классификации (рис. 1) перейдет к задаче каталогизации технологий. Знания авторов по экономике, биологии и педагогике скромны, поэтому последующее изложение во многом предположительно. К сожалению, нам не удалось привлечь узких специалистов-практиков к абстрактной работе по применению технологического подхода

к трем большим сферам. Сказывается печальная болезнь специализации в науке и тяжелое бремя выживания ученых в современной российской действительности, не оставляющая специалистам время понять лучше их собственную науку.

### КАТАЛОГ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ ТЕХНИКИ (ЭКОНОМИКИ)

Основные черты промышленных технологий: жесткость, относительная простота, быстрота эволюции. При их анализе мы должны принимать во внимание историческое время; анализ истории даже одной микроэлектроники [22] поучителен. Анализ первобытных технологий важен, но мы поступим иначе и будем анализировать современные технологии, несмотря на их многообразие, постулируя, что основные группы технологий остались прежними, хотя и стали более сложными. Традиционно группу промышленных технологий называют отраслью, по распространенному определению: отрасль – это совокупность предприятий, производящих однородную продукцию, или учреждений, оказывающих однородные услуги (и тогда экономика – это совокупность отраслей).

Старая советская классификация разделяла экономику на производственную и непроизводственную сферы. К непроизводственной относили: здравоохранение, образование, науку, культуру, социальное обеспечение, охрана правопорядка, бытовое обслуживание. К производственной относили промышленность, строительство, сельское хозяйство, транспорт, связь. Промышленность делили на легкую (швейная и обувная) и тяжелую (энергетика, металлургия, машиностроение). Иногда отрасли объединяли в комплексы. В научном комплексе СССР было занято 3,5 млн чел., что составляло 18% от всех ученых мира. Более крупная единица деления – сектор: 1-й сектор называли сырьевым (добывающим), 2-й сектор – перерабатывающим (обрабаты-

вающим), 3-й сектор отождествляли со сферой услуг (включая транспорт и торговлю). Теперь выделяют 4-й сектор, связанный с информационными технологиями (в обыденном понимании).

Для лучшего налогообложения и управляемости государство ввело Общероссийский классификатор видов экономической деятельности (ОКВЭД) вместо устаревшего общесоюзного ОКОНХ. С 2014 года осуществляется переход на ОКВЭД-2. Первая версия ОКВЭД содержала разделы от А до Q (см. ниже), вторая – от А до U:

- А. Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство
- В. Рыболовство, рыбоводство
- С. Добыча полезных ископаемых
- Д. Обрабатывающие производства
- Е. Производство и распределение электроэнергии, газа и воды
- Г. Строительство
- С. Оптовая и розничная торговля; ремонт автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного пользования
- Н. Гостиницы и рестораны
- И. Транспорт и связь
- Ж. Финансовая деятельность
- К. Операции с недвижимым имуществом, аренда и предоставление услуг
- Л. Государственное управление и обеспечение военной безопасности; социальное страхование
- М. Образование
- Н. Здравоохранение и предоставление социальных услуг
- О. Предоставление прочих коммунальных, социальных и персональных услуг
- Р. Деятельность домашних хозяйств
- Q. Деятельность экстерриториальных организаций.

К сравнению версий ОКВЭД. Разделы А и В были закономерно объединены в один; раздел Е «приобрел» кондиционирование воздуха, но по-прежнему смешиваются энергетические и другие ресурсы (вода, воздух), при этом законодатель отдельной позицией ввел водоотведение, утилизацию отходов и рекреационную деятельность, что можно приветствовать. По-прежнему сохраняется непонятное соседство торговли и ремонта автомобилей в разделе С. Интересным для классификации объектом выступают гостиницы и рестораны (литера Н): технологии, относясь к мягким, несомненно, существуют; оставим этот вопрос на будущее, но скорее их лучше отнести к транспортно-складским (рис. 1). Законодатель совершенно верно свел в одну группу

«транспортировка на хранение» и выделил из нее связь (последнее, как ни странно, сомнительное действие, т.к. осуществление связи есть пример транспортной технологии). Соображения законодателя понятны, будучи обусловлены взаимопроникновением информационных и транспортных технологий (в наших определениях). Для ОТТ непонятно введение раздела «деятельность профессиональная, научная и техническая» – здесь технологии слабо просматриваются, как и в заключительных разделах (литеры Р, Q). Наиболее интересным разделом является D (С – в классификаторе 2017 г.), содержащий пункты с 10 по 33 – например, 22 – Производство резиновых и пластмассовых изделий, 23 – Производство прочей неметаллической минеральной продукции, 24 – Производство металлургическое, 25 – Производство готовых металлических изделий, кроме машин и оборудования.

Существует Международная стандартная отраслевая классификация всех видов экономической деятельности (МСОК; ISIC – International Standard Industrial Classification of All Economic Activities), разработанная ООН. Четвертая версия ISIC актуальна с 2008 года, а ОКВЭД – по сути её русифицированный перевод. Глобальный стандарт классификации отраслей (ГСКО) (Global Industry Classification Standard, GICS) – это отраслевая таксономия, совместно разработанная в 1999 году компаниями MSCI и Standard & Poor's для использования в финансовой сфере и состоящая из 10 секторов (теперь 11, за счет недвижимости), 24 отраслевых групп, 67 отраслей и 156 подотраслей. Система имеет 4 уровня иерархии и периодически обновляется. Основные сектора GICS в редакции 2006 года [18] представлены в табл. 2.

В этой классификации микроэлектроника (Semiconductors) отнесена к информационным технологиям (ИТ). Обычное понимание ИТ наследуется от определения информатики: «ресурсы, необходимые для сбора, обработки, хранения и распространения информации (ISO/IEC38500:2008)». Однако технологический подход заставляет сузить это определение, говоря лишь о создании новой информации – либо из фактологического материала, либо путем переработки «низкоуровневой». За хранение и распространение информации, где её носитель и она сама выступает в качестве субстрата, отвечают в нашей классификации транспортные (транспортно-складские) технологии, что справедливо отражено группой Telecommunication Services GICS. Тоже самое можно сказать о технологиях энергетики, где в одну группу пытаются свести производство мате-

Таблица 2. Основные сектора GICS в редакции 2006 года [18]

Код	Сектор	Субкод	Промышленная группа
10	Energy	1010	Energy
15	Materials	1510	Materials
20	Industrials	2010	Capital Goods (Средства производства)
		2020	Commercial & Professional Services
		2030	Transportation
25	Consumer Discretionary (Индивидуальное потребление; второстепенные нужды)	2510	Automobiles and Components
		2520	Consumer Durables and Apparel (потребление товары длительного пользования)
		2530	Consumer Services
		2540	Media
		2550	Retailing (Розничная торговля)
30	Consumer Staples (Повседневное потребление; насуточные нужды)	3010	Food & Staples Retailing
		3020	Food, Beverage & Tobacco
		3030	Household & Personal Products
35	Health Care	3510	Health Care Equipment & Services
		3520	Pharmaceuticals, Biotechnology & Life Sciences
40	Financials	4010	Banks
		4020	Diversified Financials
		4030	Insurance (Страхование)
		4040	Real Estate (Недвижимость)
45	Information Technology	4510	Software & Services
		4520	Technology Hardware & Equipment
		4530	Semiconductors & Semiconductor Equipment
50	Telecommunication Services	5010	Telecommunication Services
55	Utilities (Приспособления)	5510	Utilities

риалов (нефть и т.п.) и её распределение и доставку. Последняя группа GICS Utilities почти дословно повторяет введенный нами (рис. 1) раздел «утилитарно-функциональных» технологий, хотя, вероятно, есть лишь его подмножество. Нетрудно также заметить, что в этих классификаторах в промышленные технологии вплетены социальные, но здесь хотя бы возможно быстрое отсечение «гуманитарных» групп.

В целом эти классификаторы представляют первичный материал, из которого ОТТ сможет в будущем вывести каталог промышленных технологий. С этой точки зрения наиболее удобно взять первой рубрикой буквы М, И, Э, Т (см. рис. 1), а второй рубрикой – критерий технологического назначения (для М: С, М, У, Д). В рамках одной статьи, разумеется, возможно лишь предварительное осмысление и исследование этих вопросов.

### КАТАЛОГ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ БИОЛОГИИ КЛЕТКИ И ФИЗИОЛОГИИ

Следует еще раз отметить, что между промышленными (искусственными) и биологическими (естественными) технологиями различия весьма существенны, но, на наш взгляд, и сходство достаточно заметно, чтобы понятие «технология» было применимо и в этой сфере. Иными словами, различие видовое, но не родовое. Если подходить с утилитарной точки зрения, а не созерцательной (нашей текущей), то слабая изученность биологических технологий ввиду сложности, а значит и плохая числовая формализация, мешает их использованию в смешанных технологиях и медицине. Однако можно привести антипример: аспирин давно стал признан-

ным лекарством, но механизм действия простой по структуре ацетилсалициловой кислоты на физиологию человека, насколько нам известно, до конца не изучен (о взаимодействии Науки и Технологии в Великой Триаде [1]).

Отличительными чертами естественных технологий являются:

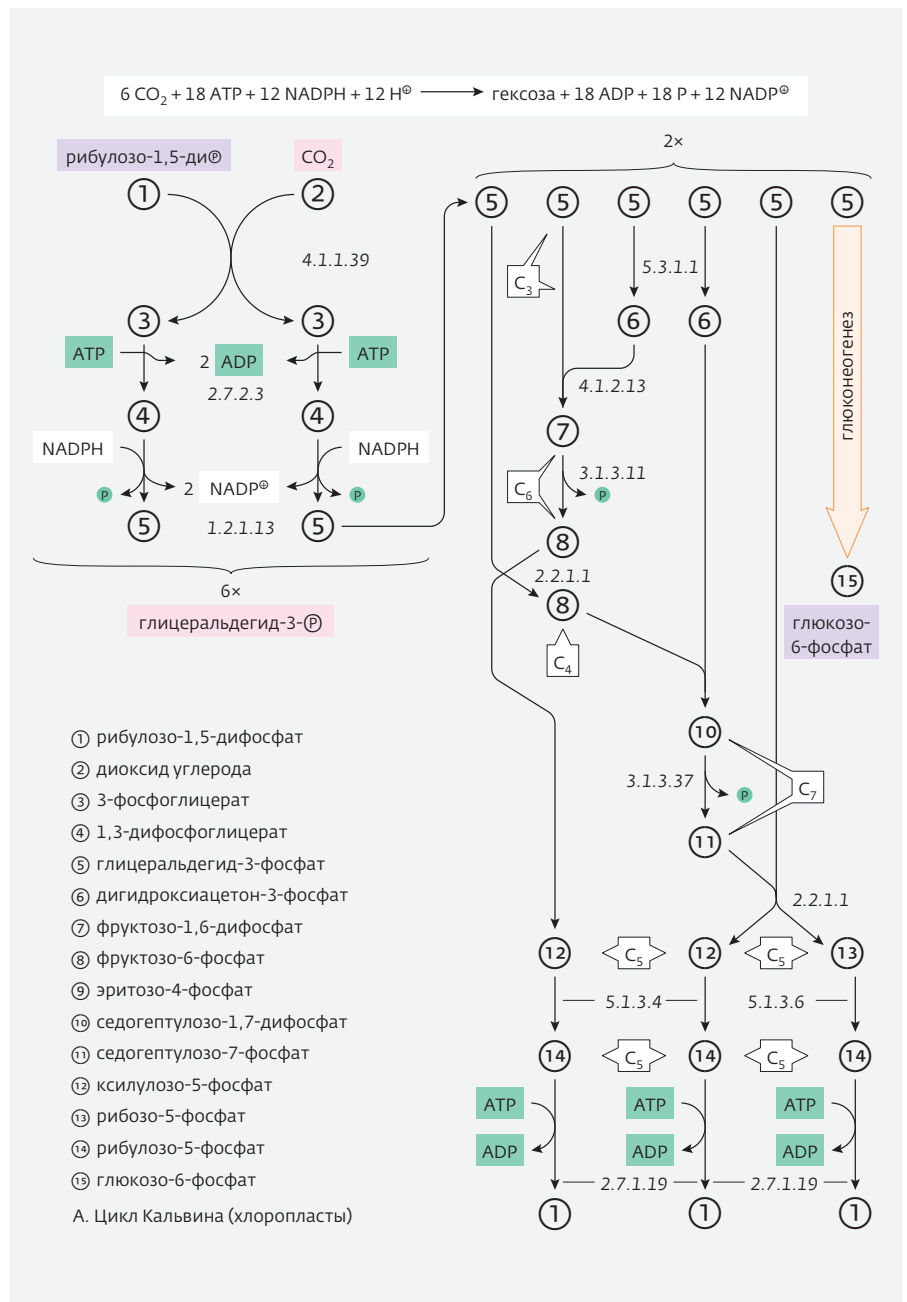
- наличие двух подклассов: внутриклеточных (назовем их биохимическими) и надклеточных, или организменных (назовем их физиологическими) технологий;
  - реализация ТО происходит, как правило, в жидкой и суспензионно-коллоидной среде, для которой существенны неуправляемые диффузионные процессы, носящие статистический характер;
  - ТМ вариативен, поэтому жесткие технологии редки;
  - роль управления берут на себя многочисленные обратные связи, причем в отличие от промышленных технологий их инерционность мала по сравнению с характерным временем ТО; эти связи реализуются медиаторами разной природы (гормоны, синаптические), физиологи обычно говорят о нейрогуморальной регуляции;
  - сильная перекрестность ТМ, прежде всего пространственная; функциональная перекрестность ТМ иллюстрируем на примере полифункциональности инсулина, регулирующего не только потребление глюкозы, но и заживление ран.
- Остановимся на каталогизации биохимических технологий. Специалисты в области биохимии отсылают к т.н. «метаболическим картам» [24] или даже «ядру метаболизма» [25], где перечислены основные группы реакций, в нашем понимании занимающие место между ТО и ТМ.

На рис. 2. показан цикл Кальвина (теневая фаза фотосинтеза в хло-

ропластах; обратим внимание – есть результирующая реакция) [24]:

Авторы [24] выделяют 13 основных метаболических карт:

1. Цикл Кальвина (хлоропласты)
2. Углеводный обмен
3. Биосинтез жиров и мембранных липидов
4. Биосинтез кетоновых тел и стероидов



**Рис. 2.** Цикл Кальвина, иллюстрирующий сложность и технологичность живой природы. Для каждой биохимической реакции приводится классификационный код соответствующего фермента

5. Распад жиров и фосфолипидов (ферментативная деградация)
6. Биосинтез незаменимых аминокислот
7. Биосинтез заменимых аминокислот
8. Деградация аминокислот (карта I)
9. Деградация аминокислот (карта II)
10. Конверсия аммиака
11. Биосинтез пуриновых нуклеотидов
12. Биосинтез пиримидиновых нуклеотидов и перенос C1-фрагментов
13. Распад мононуклеотидов.

Очевидно, что 3-я карта имеет непосредственное отношение к строительной технологии (синтез мембран), но сама эта технология, по-видимому, нам неизвестна в деталях.

Как мы полагаем, технологический подход и попытка ОТТ каталогизировать биохимические и физиологические технологии позволят по-новому взглянуть на их существующие систематизации.

## КАТАЛОГ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ СОЦИУМА

Напомним определение. Социальной технологией называется такая технология, целевым изделием которой выступает человек. С момента его рождения общество опосредованно влияет на него, начиная через семью (ячейку общества). Одним из критериев успеха таких технологий выступает «социализация». Школьное и высшее образование помимо необходимых профессиональных знаний и навыков дают еще и навыки социализации, сосуществуя последовательно или параллельно. Государство и церковь присоединяют к ним свои «пропагандистские» технологии. По Эллюлю, пропаганда – это набор методов, используемых организованной группой, которая хочет добиться активного или пассивного участия в своих акциях массы индивидов, объединенных с помощью психологических манипуляций и включенных в организацию [5].

К этим технологиям мы бы прибавили технологии менеджмента и инжиниринга организаций. Для каждой промышленной или смешанной технологии требуется решение кадрового вопроса, причем не только в аспекте наличия квалифицированных специалистов, но и в аспекте их взаимодействия внутри коллектива, внутри корпоративной структуры.

Отличительный признак социальных технологий – неполная степень контроля над производством. Если у подростка есть свободное время, то вовсе не обязательно, что дома или в школе, он употребит его с пользой для общества или собствен-

ного развития. Да и в сфере СМИ государство еще не до конца осуществляет контроль над информационным контентом (а ведь задачи контроля являются важнейшим элементом любой технологии по определению). И здесь логичные требования Мегамашины, по Мамфорду [26], вступают в противоречие с императивом современной экзистенциальной философией.

Более подробно мы рассмотрим социальные технологии и специфику их ресурсов в следующей части.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уже на этапе разработки методологии ОТТ, выработки критериев технологичности физического (или иного рода) процесса в попытке найти определение понятию «технология», а здесь, по-видимому, ситуация такая же, как и с дефиницией человека, мы пришли к новым терминам, обогатившим ОТТ:

1. **Субстрат.** Слово взято из ферментативной кинетики, являясь однокоренным с «substance» (подлежащей сущностью бытия). В нашем понимании технологии субстрат – это исходная, первоначальная пассивная основа для последующих воздействий в ходе ТО. От других факторов производства его отличает способность частично сохранять прежнюю форму и свойства. Это согласуется со следующим определением из Википедии: «под субстратом понимают те простейшие структуры или образования, которые остаются устойчивыми, неизменными при любых преобразованиях вещи и обуславливают её конкретные свойства».
2. **Целевой продукт (изделие).** Под «изделием» в широком смысле понимаем ожидаемый и/или реализованный результат применения ТО или ТМ, придающий технологии смысл и составляющий условие её выживания (наблюдаемости) в системе технологий;
3. **Технэ (третья форма).** Старое греческое слово используется нами как термин. Технэ – совокупность всей информации (знаний), необходимых для получения изделия. На уровне ТО в микроэлектронике это рецепты техпроцессов (отображение режимов функционирования, циклограмм для оборудования). В расширенном понимании это не только третья форма, но и вторая, т.е., например, конечная структура изделия, знание которой необходимо для методов контроля;
4. **Технологическая среда** (ambient, не путать с environment в учебниках экологии или менеджмента). Под ней мы понимаем совокупность

(искусственно созданных) особенностей пространственно-временной локализации производственного процесса, улучшающих его контролируемость и воспроизводимость.

Ориентированный на практику читатель, несомненно, задастся вопросом: «Зачем практически нужна ОТТ? Какая от нее польза?». Мы выскажемся в том смысле, что систематизация всегда полезна, а из опыта других технологий всегда можно узнать что-то подходящее для интересующей его технологии, не дожидаясь, пока проблема встанет во весь рост. Специалисты РЖД, например, могли бы заранее предусмотреть затраты на огораживание путевого пространства, исходя из понятия Тс. Менеджеры производства микросхем могли бы увидеть плюсы опережающей диверсификации или персонализации (платформа ПЛИС для набирающих популярность обучаемых нейросетей, например, в составе Интернет-вещей). Учитывая успешную сложность и перекрестность биохимических технологий, на микроэлектронном предприятии можно было бы, например, подумать о наличии людей-интермедиаторов, посредничающих в роли консультантов между кремниевой технологией и смежными с ней, и таким образом, выполняющих, хотя бы на консультационном уровне, роль регуляторов. Впрочем, менеджеры часто как раз обладают [27] знаниями рынка потребителей и рынка поставщиков, а иногда и есть соответствующие организационные структуры, но знания ОТТ сделали бы их работу более осмысленной, акцентированной и не слишком афилированной.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Миронов А. В.** Философия науки, техники и технологий. – М.: МАКС Пресс, 2014. 272 с.
2. **Романенко В. Н., Никитина Г. В.** Общие технологии. – СПб: Изд. ИВЭСЭП, 2011. 277 с.
3. **Моль А.** Теория информации и эстетическое восприятие. – М.: Мир Год, 1966. 352 с.
4. **Белоусов А.** «Пропаганда» Жака Эллюля / Пер. фрагментов «Внешние признаки пропаганды», «Индивид и массы» (2010) // Свободная мысль. 2010. № 4 (1611). С. 167–182.
5. **Эллюль Ж.** Триумф абсурда // «Технологический блеф», Это человек. Антология. – М.: Высшая школа, 1995. С. 265–294 <http://samzan.ru/92275>.
6. **Уголев А. М.** Естественные технологии биологических систем. – Л.: Наука, 1987. 317 с.
7. **Красников Г. Я., Зайцев Н. А.** Физико-технологические основы обеспечения качества сбис. – М., 1999. Ч. 2..
8. **Баранчик Ю. В.** Статья «гилеморфизм» / История философии. Энциклопедия / Сост. Грицанов А. А. – Минск: Интерпрессервис; Книжный Дом, 2002. 1376 с.
9. **Шредингер Э.** Что такое жизнь с точки зрения физики? – М.: РИМИС, 2009. 176 с.
10. **Красников Г. Я., Гушин О. П., Матюшкин И. В., Морозов А. Д.** Концептуализация проблемного поля современной литографии при переходе к проектным нормам 45–22 нм // Наноинженерия. 2014. 12 (42). С. 8–19.
11. **Розенталь Р. М.** Обманчивая простота причин и следствий // Поволжский вестник качества. 2009. № 1.
12. **Никаноров С. П.** Задачник по концептуальному мышлению. – М: Концепт, 1999. 61 с.
13. **Никаноров С. П., Никитина Н. К., Теслинов А. Г.** Введение в концептуальное проектирование АСУ: анализ и синтез структур / 2-е изд. – 2007. 276 с.
14. **Иванов А. Ю., Никаноров С. П., Гараева Ю. Р.** Справочник по теоретико-системным конструктам. – Концепт, 2008. 314 с.
15. **Пономарёв И. Н.** Введение в математическую логику и роды структур. – МФТИ, 2007. 244 с.
16. **Ивановский И. В., Клепов Ю. В.** Разнообразие кооперационных отношений в теории систем процессов с ролями // Сб. тезисов докладов и сообщений научной конференции «Освоение и концептуальное проектирование интеллектуальных систем». – М.: ЦНИИЭУС Госстроя СССР, 1990. Ч. I. С. 102–105.
17. **Терешкун О. Ф.** Антропологическое осмысление техники (Э. Капп и П. Флоренский) // Приволжский научный вестник. 2013. № 9 (25). С. 46–53.
18. **Воеводин Вл. В.** Кодизайн суперкомпьютерных центров // Материалы международной конференции ПАВТ-2017, Казань, 03–07 апреля 2017, презентация – <http://omega.sp.susu.ru/PaVT2017/talks/Voevodin.pdf>
19. **Докинз Р.** Эгоистичный ген / Пер. с англ. Н. Фоминой. – М.: АСТ: CORPUS, 2013. 512 с. <http://groh.ru/gro/dawkins/dawkins.html>
20. **Черникова И. В.** Когнитивные науки и когнитивные технологии в зеркале философской рефлексии // Epistemology & Philosophy of Science. 2011. № 1. С. 101–116.



21. **Красников Г. Я., Горнев Е. С.** Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон // В сб.: История отечественной электроники. В 2-х т. – М., 2012. С. 539–563.
22. Классификатор GICS на сайте Университета Нового Мехико. <http://www.unm.edu/~maj/Security%20Analysis/GICS.pdf>
23. Неофициальный справочник. Метаболические карты. <http://www.drau.ru/meta/index.html>
24. Объединенная сеть важнейших и наиболее общих биохимических реакций («ядро метаболизма») [http://dytiscience.narod.ru/Chemistry/Biochemical\\_network\\_quality-4.jpg](http://dytiscience.narod.ru/Chemistry/Biochemical_network_quality-4.jpg)
25. **Мамфорд Л.** Миф машины: техника и развитие человечества / Пер. с англ. Азаркович Т., Скуратов Б. (1 глава). – М.: Логос, 2004. 284 с.
26. **Красников Г. Я., Шелепин Н. А.** Состояние и перспективы развития технологий и элементной базы СБИС с энергонезависимой памятью // В кн.: Проектирование систем на кристалле: тенденции развития и проблемы Тезисы докладов. 2010. С. 55.

# МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ СЛОЕВ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

► В.Л. Евдокимов  
ПАО «Микрон»

Разработана молекулярно-кинетическая модель процесса осаждения слоев из газовой фазы, включающая комплексную схему и выражения для расчета скоростей стадий гетерогенного и гомогенного роста. Модель учитывает диффузию, адсорбцию и химическое превращение реагентов с образованием на подложке и в пограничном газовом слое основного, побочного продуктов и кластеров. Сформулированы показатели химической, структурной и топологической неоднородностей как базовых, определяющих отклонения технологических и эксплуатационных характеристик слоев. Даны выражения для количественной оценки и прогнозирования неоднородностей слоев для различных условий роста. Апробация модели на примере осаждения оксида кремния показала удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

## MODELING OF KINETICS OF CHEMICAL VAPOR DEPOSITION AND THE BASIC CHARACTERISTICS OF THE LAYERS

V. L. Evdokimov

Micron PJSC

Developed the molecular-kinetic model of formation of layers from the gas phase, including complex kinetic scheme and equations for calculations of the speeds of heterogeneous and homogeneous growth. The growth rate takes into account the stage of diffusion, adsorption and chemical reaction with the formation on the substrate and in a boundary layer of the main gas, by-products and clusters. Defined indicators of chemical, structural and topological inhomogeneities, as the base, define technological and operating characteristics of the layers. This expression for quantifying the baseline. Testing models for analysis of deposition process of silicon oxide showed satisfactory agreement between calculated and experimental data.

### ВВЕДЕНИЕ

Процессы газофазного химического осаждения слоев являются одними из основных в технологии изготовления микросхем [1, 2]. Широкое применение находят процессы осаждения слоев оксида и нитрида кремния, поликристаллического кремния, вольфрама, нитрида титана и др., осаждаемых способом термической активации химической реакции исходных реагентов [3, 4]. В работах [5–14] дан анализ процессов газофазного осаждения различных типов слоев, представлены схемы и модели процессов в концеп-

ции пограничного газового слоя. В работах отмечена роль адсорбции, химической реакции и образования побочных продуктов, а также отмечены вопросы образования микрочастиц и формирования профиля слоев при гетерогенном и гомогенном механизмах роста. Однако указанные работы не дают комплексного представления о стадиях протекания процесса газофазного осаждения и их роли в формировании состава, структуры и топологии слоев. Для оптимизации процессов осаждения и прогнозирования характеристик слоев требуется разработка адекватной модели.

## КИНЕТИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ

1. В процессе химического осаждения из газовой фазы слой формируется через стадии доставки реагентов к подложке, адсорбции и химического превращения в основной и побочный продукты в газовом пограничном потоке и на поверхности подложки с отводом летучих продуктов реакции. Формирование слоя может быть представлено кинетической схемой, включающей стадии процесса по ветвям 1–3 в потоке и на подложке (рис. 1).

По первой ветви молекулы исходного реагента  $G_0$  диффундируют через пограничный газовый слой (через поток) к подложке со скоростью  $r_{g0}$  к активной области потока толщиной  $\delta$  с концентрацией реагента  $G$ . Реагент диффундирует со скоростью  $r_g$ , приходя к подложке с концентрацией  $G_s$  и адсорбируется со скоростью  $r_{ga}$  при поверхностной концентрации  $G_a$ . На подложке реагент превращается ( $r_s$ ) в основной продукт  $S_1$ . Одновременно с этим на подложке образуется ( $r_i$ ) летучий побочный продукт с поверхностной концентрацией  $I_s$ . Его молекулы, десорбируясь ( $r_d$ ) вследствие энергии экзотермической реакции и релаксировав ( $r_{da}$ ) в газовых столкновениях, реадсорбируются ( $r_i$ ) и захватываются в растущий слой с поверхностной концентрацией  $I_a$ . Часть десорбированного побочного продукта диффундирует ( $r_{id}$ ) к внешней границе эффективной области потока и далее ( $r_{i0}$ ) – наружу пограничного слоя.

Вторая ветвь включает в себя превращение ( $r_v$ ) реагента  $G$  в объеме потока в основной продукт  $S$  в молекулярном виде. Продукт диффундирует из

области максимума скорости химической реакции в активной области (детальнее см. 5.2.2) в сторону подложки ( $r_{sv}$ ), а также наружу пограничного слоя ( $r_{s0}$ ). Основным продуктом, как имеющий низкую летучесть, неограниченно захватывается в растущий слой  $S_2$ . Побочный продукт ( $r_{iv}$ , концентрация  $I_v$ ) также диффундирует к подложке и наружу газового слоя ( $r_{is}$  и  $r_{i0}$ ). Часть его адсорбируется на подложке ( $r_{i2}$ ) с поверхностной концентрацией  $I_a$  и включается в состав растущего слоя.

Третья ветвь контролирует зарождение и рост кластеров (концентрация  $C$ ), образующихся в потоке за счет побочного и основного продуктов ( $r_{ic}$  и  $r_{sc}$ ). Кластеры диффундируют ( $r_{nc}$ ) к подложке, встраиваясь в растущий слой с поверхностной концентрацией  $C_s$ . Другая часть диффундирует из активной области наружу пограничного слоя ( $r_{c0}$ ).

2. Подчеркивая значение скоростей указанных стадий, отметим, что их соотношение по ветвям процесса определяет химическую чистоту, совершенство физической структуры и топологическую равномерность слоев. Отношения скоростей по различным стадиям гетерогенного и гомогенного роста приняты в настоящей модели как базовые, принципиально определяющие физико-химические и технологические характеристики слоев. Химическое загрязнение побочным продуктом определяется отношением скорости его накопления в слое к общей скорости роста. Степень нарушения физической структуры определяется долей скорости гомогенного роста за счет кластеров и за счет дезактивированных молекул основного продукта в общей ско-

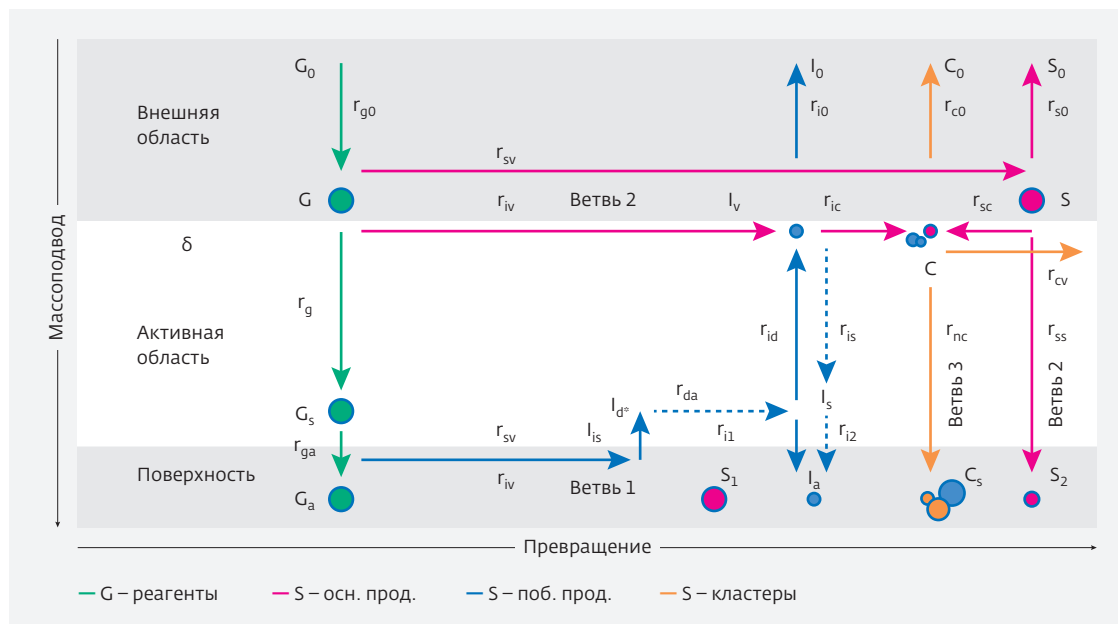


Рис. 1. Кинетическая схема стадий процесса осаждения в пограничном газовом слое

рости роста, включающей и гетерогенную. Топологическая неравномерность слоя на подложке, в том числе развитость поверхности и неконформность на микрорельефе, определяется скоростью доставки реагентов и продуктов относительно общей скорости роста.

## СКОРОСТИ СТАДИЙ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЯ

Примем общее химическое уравнение превращения реагентов  $G + aJ = bS + cI$ , где  $G$  – главный реагент, например, силан или хлорсилан, содержащий основной элемент выращиваемого слоя (для этих реагентов – кремний),  $J$  – второй реагент, например, кислород, или аммиак,  $S$  – основной продукт реакции,  $I$  – побочный продукт. Побочными продуктами для различных химических реакций осаждения слоев могут быть такие летучие соединения как вода, органика, хлориды, амины и др. Здесь стехиометрические коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  обозначены в виде, приведенном к одной молекуле главного реагента. Основываясь на классических положениях молекулярной кинетики реакций, диффузии и адсорбции, рассмотрим скорости стадий формирования слоя по ветвям процесса.

### 1. Скорости стадий 1-й ветви

1.1. Скорость диффузионной доставки реагента к подложке при допущении постоянного градиента концентрации, в соответствии с законом Фика,  $r_g = D_g \text{grad} G = (G - G_s) D_g / \delta$ , где  $D_g$  коэффициент диффузии реагента (здесь и ниже молекулярные потоки диффузии, адсорбции и химического превращения –  $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$  – названы скоростями).

1.2. Скорость адсорбции реагента в соответствии с законом Генри  $r_{ga} = G_s v_g$ , где  $v_g$  – скорость теплового движения молекул. Это выражение справедливо для малых степеней заполнения поверхности и может быть принято для процессов осаждения, так как поверхность постоянно обновляется материалом растущего слоя. С учетом коэффициента аккомодации энергии адсорбирующихся молекул  $r_{ga} = G_s v_g k_{gs}$ .

1.3. Так как второй реагент обычно поддерживается в избытке, примем химическую реакцию как мономолекулярную, первого порядка по основному реагенту. В соответствии с уравнением Аррениуса скорость реакции  $r_s = G_a v_0 e^{-E/RT_s}$ . Выразив время адсорбции реагента через частоту, как  $\tau_a = 1/v_a = v_0^{-1} e^{-Qg/RT_s}$ , и с учетом  $G_a = r_{ga} \tau_a$  получим выражение  $r_s = G_s v_g e_1 k_{gs}$ , где  $e_1 = e^{-(E+Qg)/RT_s}$ ,  $E$  – энергия активации химической реакции.

1.4. Из общего уравнения реакции следует, что скорость образования побочного продукта связана со скоростью для основного через отношение стехиометрических коэффициентов  $c/b$ , как  $r_i = r_s c/b$ , тогда с учетом 1.3.  $r_i = G_s v_g e_1 k_{gs} c/b$ .

1.5. Для скорости адсорбции побочного продукта, образующегося на подложке учтем стадии его быстрой десорбции ( $r_d$ ) вследствие экзотермической реакции, дезактивации ( $r_{da}$ ) и реадсорбции ( $r_{ai}$ ) (рис. 1). Для оценки скорости реадсорбции ( $r_{ai}$ ) оценим влияние теплового эффекта ( $\Delta H$ ) химической реакции. В типичном случае экзотермической реакции со значительным тепловым эффектом, как, например, при окислении силанов, когда тепловой эффект высок ( $\Delta H > 10^2$  ккал/моль), побочный продукт, образующийся на подложке ( $I_s$ ), активно десорбируется вследствие полученной им дополнительной энергии. При этом эквивалентная температура молекул, оцениваемая, как  $\Delta T = \Delta H/R$ , соответствует нескольким тысячам градусов, а время адсорбции, определяемое как  $\tau_{ai} = \tau_0 e^{(Q_i - \Delta H)/RT_s}$ , имеет величину лишь порядка  $10^{-30}$  с. Быстро десорбированные возбужденные молекулы ( $I_d$ ) затем дезактивируются в газовых столкновениях, ( $r_{da}$ , концентрация  $I_s$ ) и после этого реадсорбируются ( $r_{ai}$ ) уже со своей равновесной энергией. Учтем, что при темпе передачи избыточной энергии в столкновениях с окружающими «холодными» молекулами, выражаемое через коэффициент аккомодации энергии, как  $k^n$  ( $k=0, 2-0, 3$ ,  $n$  – число последовательных столкновений), возбужденная молекула рассеивает почти всю избыточную энергию после 3-х столкновений:  $1, 0 \Delta H - 0, 3^3 \Delta H > 0, 97 \Delta H$ . Для типичных условий процесса при давлении  $10^{-1}$  мм рт. ст. время рассеивания энергии в указанных трех столкновениях составляет величину порядка  $\tau = 3\lambda/v \approx 3 \cdot 10^{-7}$  с. Как видим, эта величина существенно меньше характерного времени диффузии молекул от подложки, равного  $\tau = \delta^2/D_i \approx 10^{-5}$  с. Отсюда следует, при столь коротком периоде рассеяния энергии, концентрация возбужденных молекул вблизи поверхности подложки не способна существенно уменьшиться диффузионным оттоком ( $r_{id}$ ). Поэтому концентрация дезактивированных молекул может быть принята приблизительно равной концентрации возбужденных десорбированных  $I_s \approx I_d$ . После дезактивации часть молекул из числа  $I_s$ , находящихся у поверхности на расстоянии порядка длины свободного пробега  $\lambda$ , сталкивается с подложкой и адсорбируется со скоростью  $r_{ii} = I_s v_i k_{is}/2$ . Здесь  $k_{is}$  – коэффициент аккомодации. Множитель  $1/2$  показывает долю молекул, траектории которых направлены в сторону подложки во всем диапазоне пространственных углов.

1.6. Скорость диффузионного выноса побочного продукта из активной и внешней областей потока (толщиной  $2\delta$ ),  $r_{id}=(I_d-I_0)D_i/2\delta$  или, так как  $I_d \approx I_s$ ,  $r_{id}=(I_s-I_0)D_i/2\delta$ . Учитывая малость величины  $I_0$  в ядре потока вне пограничного слоя, примем  $r_{id} \approx I_s D_i/2\delta$ .

1.7. Общая скорость роста слоя за счет основного и побочного продуктов по первой ветви  $r_1=r_{ss}+r_{ai}$ .

## 2. Скорости стадий 2-й ветви

2.1. Скорость образования основного продукта в единице объема потока, определяемая из частоты столкновений молекул и с учетом доли эффективных столкновений в соответствии с законом Аррениуса, выражается как  $r_s$  (молек/см<sup>3</sup>с) =  $GJk_{st}sv_g e_2$ , где  $e_2 = e^{-E/RTv}$ . С учетом образования продукта в слое потока толщиной  $\delta$  и при  $G/J \sim 1$  скорость выражается как  $r_{sv} = \delta G^2 s v_g e_2 k_{st}$ , где  $T_v$  – средняя температура по сечению потока,  $k_{st}$  – стерический коэффициент, учитывающий фактор ориентации взаимодействующих молекул в столкновениях в газовой фазе.

2.2. Скорость диффузионной доставки молекул основного продукта к подложке  $r_{ss}=(S-S_s)D_s/\delta$ , где  $S$  и  $S_s$  – концентрации на границах потока. Учитывая низкую упругость паров основного продукта (твердый продукт слоя) и тот факт, что его молекулы адсорбируются на поверхности слабо занятой реагентом (по оценкам,  $G_a/G_{max} \approx 10^{-4}$ ), они захватываются растущим слоем практически с неограниченной скоростью, поэтому  $S_s \ll S$ , а  $r_{ss} = SD_s/\delta$ .

2.3. Скорость диффузионного выноса основного продукта к внешней границе потока  $r_{s0} = SD_s/\delta$ . Здесь и ниже для диффузии различных продуктов учтем, что распределение их концентрации продуктов по сечению пограничного слоя примерно симметрично (рис. 2, подробнее см. ниже 5–2.2), и толщина крайней части потока приблизительно равна толщине активной части  $\delta$ .

2.4. Скорость образования побочного продукта связана со скоростью для основного, как  $r_{iv} = r_{sv}c/b$ , или, учитывая  $r_{sv}$  из 2.1,  $r_{iv} = \delta G^2 s v_g e_2 k_{st} c/b$ .

2.5. Скорость диффузионной доставки побочного продукта к подложке  $r_{iv} = I_v D_i/\delta$ . Заметим, что в режиме преимущественно гетерогенного роста доставка побочного продукта, образующе-

гося в потоке, может подавляться ( $r_{iv} = 0$ ) встречным потоком продукта, образующимся на подложке.

2.6. В обычном случае смешанного гетерогенно-гомогенного роста концентрация побочного продукта усредняется  $I = (I_v + I_s)/2$ . При этом градиент диффузии побочного продукта к подложке мал или практически отсутствует. Тогда скорость адсорбции определяется только молекулами, находящимися от подложки на расстоянии не более длины свободного пробега. Для близких значений концентраций  $I_v$  и  $I_s$ ,  $I \approx I_v$  и аналогично  $r_{i1}$  из 1,5,  $r_{i2} = I_v v_i k_{is}/2$ .

2.7. Скорость диффузионного выноса побочного продукта через крайнюю область потока  $r_{i0} = I_v D_i/\delta$ .

2.8. Скорость роста слоя, формирующегося по второй ветви  $r_2 = r_{ss} + r_{is} + r_{iv}$ .

## 3. Скорости стадий 3-й ветви

3.1. В соответствии с классическим представлением о зарождении твердой фазы, зародыши формируются на активных центрах. Для типичных условий низкотемпературного осаждения слоев наиболее вероятными центрами являются молекулы побочного продукта, такие как полярные молекулы  $H_2O$ ,  $NH_3$  и валентно ненасыщенные радикалы типа  $Si_n H_m$ ,  $C_n H_m$  и др. Обладая повышенной внутренней энергией, они в столкновениях в газе способны к захвату молекул, в том числе основного продукта, с образованием стабильных зародышей и с последующим ростом на них многомолекулярных кластеров. Примем, что зародыши состоят из двух молекул, как наиболее вероятных при частых парных столкновениях. Зародыши образуются со

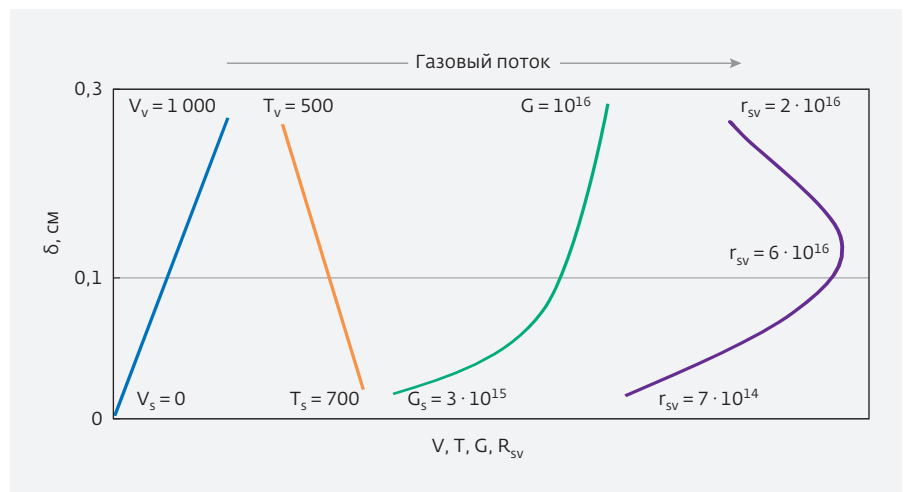


Рис. 2. Распределение скорости потока  $V$  (см/с), температуры  $T$  (К), концентрации реагента  $G$  (1/см<sup>3</sup>) и скорости образования продукта  $r_{sv}$  (1/см<sup>2</sup>с) в пограничном слое

скоростью, соответствующей частоте столкновений молекул,  $r_z^*$  (зарод/см<sup>3</sup>с) =  $\pi N^2 d_n^2 v_n k_z$ , где  $N = S + I_v$  – суммарная концентрация молекул основного и побочного продуктов, образующих зародыши,  $\pi d_n^2$  – сечение столкновения,  $v_n$  – тепловая скорость молекул продуктов,  $k_z$  – коэффициент взаимной аккомодации энергии сталкивающихся молекул. Скорость роста зародышевой фазы, выраженная в количестве молекул в составе всех зародышей на единицу поверхности подложки, и с учетом толщины потока  $\delta$ ,  $r_z$  (молек/см<sup>2</sup>с) =  $2r_z^* \delta$  или  $r_z = 2\pi \delta N^2 d_n^2 v_n k_z$ , где множитель «2» учитывает бимолекулярность зародышей.

3.2. Принимая зародыши устойчивыми в течение времени их диффузии к подложке ( $\tau_z = \delta^2 / D_z \approx 10^{-5}$  с), скорость образования кластеров соответствует скорости формирования зародышей (каждый зародыш становится в следующих столкновениях кластером), то есть  $r_c \approx r_z = \pi N^2 d_n^2 v_n k_z$ . При этом, концентрация кластеров возрастает со временем диффузии зародышей к подложке и определяется как  $C = r_c \tau_z$ , или  $C = \pi N^2 d_n^2 v_n k_z \tau_z$ , где  $\tau_z$  – время диффузии кластера.

3.3. Скорость роста кластерной фазы  $r_c$  (молек/см<sup>2</sup>с) =  $\pi \delta N C d_c^2 v_n k_{nc}$ , где  $\pi d_c^2$  – сечение столкновения кластера с молекулами продуктов,  $k_{nc}$  – коэффициент аккомодации молекул в столкновениях с кластером.

3.4. Скорость роста кластерной фазы за счет молекул только основного продукта, входящего в состав кластеров в доле  $S/N$ . Здесь и ниже это отношение для основного продукта (аналогично и для побочного) в кластерах принимается приблизительно равным установившемуся соотношению концентрации в потоке. Тогда  $r_{sc}$  (молек/см<sup>2</sup>с) =  $r_c S/N$  или  $r_{sc} = \pi \delta C S d_c^2 v_n k_{nc}$ .

3.5. Скорость роста кластерной фазы за счет молекул только побочного продукта, аналогично 3.4,  $r_{ic}$  (молек/см<sup>2</sup>с) =  $r_c I/N$  или  $r_{ic} = \pi \delta C I d_c^2 v_n k_{nc}$ .

3.6. Скорость диффузионной доставки кластеров  $r_c$  (класт/см<sup>2</sup>с) =  $C D_c / \delta$ , где  $D_c$  – коэффициент диффузии кластера. С учетом  $D_c = D_n (d_n / d_c)^{7/2}$  (подробнее см. ниже в 3.15),  $r_c = C D_n (d_n / d_c)^{7/2} / \delta$ .

3.7. Скорость диффузионной доставки основного и побочного продуктов, составляющих кластеры,  $r_{nc}$  (молек/см<sup>2</sup>с) =  $r_c (d_c / d_n)^3$ , где  $(d_c / d_n)^3$  – количество молекул в одном кластере. Учитывая  $r_c$  из 3.6,  $r_{nc} = C D_n (d_n / d_c)^{1/2} / \delta$ .

3.8. Скорость диффузионной доставки основного продукта, содержащегося в кластерах в доле  $S/N$ ,  $r_{sn}$  (молек/см<sup>2</sup>с) =  $r_{nc} S/N$ , или  $r_{sn} = C S D_n (d_n / d_c)^{1/2} / \delta N$ .

3.9. Скорость диффузионной доставки побочного продукта, содержащегося в кластерах в доле  $I_v/N$ ,  $r_{in}$  (молек/см<sup>2</sup>с) =  $r_{nc} I_v/N$  или  $r_{in} = C I_v D_n (d_n / d_c)^{1/2} / \delta N$ .

3.10. Скорость диффузионного выноса основного продукта в молекулярном виде  $r_{s0} = S D_s / \delta$ . (Здесь и в 3.11–3.14 описываются скорости диффузии, направленной наружу пограничного слоя из области максимума скорости реакции в потоке,  $r_s$  – рис. 2).

3.11. Аналогично, скорость диффузионного выноса побочного продукта в молекулярном виде  $r_{i0} = I_v D_i / \delta$ .

3.12. Скорость диффузионного выноса кластерной фазы, включающей в себя основной и побочный продукты,  $r_{c0}$  (молек/см<sup>2</sup>с) =  $C (d_c / d_n)^3 D_c / \delta$ . Так как  $D_c = D_n (d_n / d_c)^{7/2}$ ,  $r_{c0} = C D_n (d_n / d_c)^{1/2} / \delta$ .

3.13. Скорость диффузионного выноса только основного продукта, входящего в состав кластеров в доле  $S/N$ ,  $r_{sc0} = C S D_n (d_n / d_c)^{1/2} / \delta N$ .

3.14. Скорость диффузионного выноса только побочного продукта, входящего в состав кластеров в доле  $I_v/N$ ,  $r_{ic0} = C I_v D_n (d_n / d_c)^{1/2} / \delta N$ .

3.15. Средний размер кластера  $d_c$  определим из его объема, образующегося за счет захвата молекул в количестве  $n_c$  за время  $\tau_c$  диффузии к подложке. Количество молекул захваченных в кластер составляет  $n_c = N_n v_n s_c \tau_c k_{nc}$ . С другой стороны, количество молекул в кластере  $n_c = d_c^3 / d_n^3$ , тогда  $d_c^3 / d_n^3 = N v_n s_c \tau_c k_{nc}$ . Учитывая  $\tau_c = \delta^2 / D_c$ , и  $D_c = D_n (d_n / d_c)^2 (m_n / m_c)^{1/2}$ , при  $m_n / m_c = (d_n / d_c)^3$ ,  $\tau_c = (\delta^2 / D_n) / (d_n / d_c)^{7/2} = \tau_n (d_n / d_c)^{7/2}$ . Выразив сечение столкновения  $s_c$  через диаметр кластера, получим выражение для равновесного размера кластера, связанного с концентрацией продуктов  $N$ :  $d_c = d_n^{1/5} (\pi N v_n \tau_n k_{nc})^{-2/5}$ , где  $d_n$  – усредненный диаметр молекул продуктов,  $v_n$  и  $\tau_n$  – усредненные скорость и время их диффузии к подложке,  $k_{nc}$  – коэффициент аккомодации энергии молекул в столкновениях с кластером.

3.16. Для смешанного гомогенно-гетерогенного режима необходимо также учесть вынос кластеров газовым потоком из зоны над подложкой. Для достаточно крупных кластеров время выноса кластеров будет меньше времени их диффузии к подложке. При этом все кластеры размером больше некоторого критического будут выноситься потоком и не попадут в растущий слой. Определим их критический размер. Время выноса кластера критического размера  $\tau^* = L/V$ , где  $L$  – длина пробега кластера в потоке над подложкой,  $V$  – скорость потока в активной области пограничного слоя. Условием потокового выноса является  $\tau^* < \tau_d^*$ , где  $\tau_d^*$  – время диффузии кластера критического размера. Тогда  $L/V < \delta^2 / D_c^*$ , где  $D_c^* = D_n (d_n / d_c^*)^{7/2}$  – коэффициент диф-

фузии критического кластера (см. 2–3.15). Отсюда его размер  $d_c^* \leq d_n (LD_n/V\delta^2)^{2/7}$ . Все кластеры этого и меньшего размеров будут посредством диффузии успевать попасть на подложку за период пребывания в потоке у подложки. И напротив, кластеры большего размера, не успев диффундировать к подложке, будут выноситься потоком за ее пределы. Учтем это коэффициентом потокового выноса  $k = \tau^*/\tau_c$ , где  $\tau_c$  – время диффузии крупных кластеров (размер в соответствии с выражением 3.15). Опуская промежуточные выкладки и с учетом  $\tau_c = \delta^2/D_c$ , получим выражение для коэффициента определяющего долю кластеров, которые имеют размер менее критического и диффузией достигают подложки  $k = (d_n/d_c)^{7/2} LD_n/V\delta^2$ , где  $d_n$  – размер молекул, образующих кластер,  $d_c$  – размер кластера (по 3.15). Тогда поток доставки кластеров к подложке (см. 2–3.6), имеющих размер порядка критического  $r_c^*$  (класт/см<sup>2</sup> с)  $\leq k CD_n (d_n/d_c)^{7/2}/\delta$ .

3.17. Объемная концентрация кластеров, содержащихся в осажденном слое,  $C^*$  (класт/см) =  $r_c/r$ , где  $r$  – скорость роста толщины слоя (см/с). Концентрация кластеров, приходящаяся на единицу поверхности слоя  $C_s$  (класт/см<sup>2</sup>) =  $(C^*)^{2/3}$ .

3.18. Общая скорость роста слоя, формирующегося за счет диффузионной доставки зародышевой и кластерной фаз по третьей ветви,  $r_3 = r_2 + r_{nc}$ .

## УРАВНЕНИЯ БАЛАНСА И ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ РЕАГЕНТА И ПРОДУКТОВ

Для определения установившихся концентраций продуктов в динамическом равновесии запишем уравнения баланса скоростей основных смежных стадий по ветвям процесса.

### 1. Баланс скоростей стадий первой ветви

1.1. Баланс скорости диффузии и адсорбции реагента,  $r_g = r_{ga}$  или  $(G - G_s) D_g/\delta = G_s v_g k_{gs}$ .

1.2. Баланс по побочному продукту, образующемуся на подложке и расходующемуся на диффузионный вынос из активной области потока и на адсорбцию,  $r_i = r_{id} + r_{ai}$ , или  $G_s v_g e_1 k_{gs} c/b = I_s D_i/\delta + I_s v_i k_{is}/2$ .

### 2. Баланс скоростей стадий второй и третьей ветвей

2.1. Для основного продукта, диффундирующего в пограничном слое в молекулярном виде, учтем, что диффузия протекает из области максимума распределения скорости реакции в двух направлениях – к подложке и наружу. Тогда уравнение баланса скоростей  $r_{sv} = r_{ss} + r_{s0} + r_{sc} + r_{sc0}$ . Учитывая при-

близительно симметричное распределение продукта относительно координаты максимума скорости образования  $r_{ss} = r_{s0}$  и  $r_{sc} = r_{sc0}$ , тогда  $r_{sv} = 2r_{ss} + 2r_{sc}$  или  $\delta G^2 s_g v_g e_2 k_{st} = 2SD_s/\delta + 2\pi\delta SC d_c^2 v_s k_{sc}$ .

2.2. По побочному продукту, расходующемуся на образование зародышей и рост кластеров в балансе его потерь в составе кластерной фазы диффундирующей к подложке и наружу пограничного слоя  $r_z/2 + r_{ic} = r_{in} + r_{ic0}$ . Так как при симметричном распределении  $r_{in} = r_{ic0}$  и  $r_z/2 + r_{ic} = 2r_{in}$ , то  $\pi\delta N^2 d_n^2 v_n k_z + \pi\delta CI_v d_c^2 v_i k_{ic} = 2I_v CD_i/\delta N$ .

## 3. Решение системы уравнений баланса

Для расчета скоростей стадий и показателей неоднородностей выращиваемого слоя, определим выражения для установившихся  $G_s, I_s, S, I_v, C$  и  $d_c$ . Опуская промежуточные выкладки, решение системы уравнений баланса дает следующие выражения для неизвестных:

3.1. Из 3–1.1  $G_s = GD_g/(D_g + \delta v_g k_{gs})$ .

3.2. Из 3–1.2  $I_s = 2c\delta\lambda G_s v_g e_1 k_{gs}/b(2D_i\lambda + \delta v_i k_{is})$ .

3.3. Решение системы уравнений 2–3.2, 2–3.15 и 3–2.1, с неизвестными  $C, d_c$  и  $S$  (приняв  $S \sim I_v$ ) дает выражение:  $S = [(\beta^2 + 4\alpha\gamma\chi^2\varphi)^{1/2} - \beta]/2\gamma\chi^2\varphi$ , где  $\alpha = \delta G^2 s v_s e_2 k_{st}$ ,  $\beta = 2D_s/\delta$ ,  $\gamma = \pi\delta d_c^2 v_s k_{sc}$ ,  $\chi = d_n^{1/5}(\pi v_n \tau_n k_{ic})^{-2/5}$ ,  $\varphi = 2\pi d_n^2 v_n k_z \tau_z$ .

3.4. Значение  $I_v$  дает решение уравнения 3–2.2 (допуская  $N \sim I_v$ ):  $I_v = [(b^2 - 4ac) - b]/2a$ , где  $a = \pi\delta d_n^2 v_n k_z$ ,  $b = \pi\delta C d_c^2 v_i k_{ic}$ ,  $c = 2CD_i/\delta$ .

3.5. По 2–3.2, так как  $N = S + I_v$ , и при полученных в 4–3.3 и 4–3.4  $S$  и  $I_v$ ,  $C = 2\pi N^2 d_n^2 v_n k_z \tau_z$ .

3.6. По 2–3.15 при таком же  $N d_c = d_n^{1/5}(\pi N v_n \tau_n k_{ic})^{-2/5}$ .

Используя полученные выражения, можно рассчитать скорости стадий роста и показатели неоднородности слоев, предусматриваемые моделью.

## ПОКАЗАТЕЛИ НЕОДНОРОДНОСТИ И УСЛОВИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Отклонения химического состава, структуры и топологии осаждаемых слоев могут быть охарактеризованы показателями примесности, полиморфности и неконформности, как показателями неоднородностей, вычисляемыми по отношениям величин соответствующих скоростей стадий роста.

### 1. Формулировка показателей неоднородности

1.1. Показатель примесности слоя определяется как доля скорости роста слоя по включениям побочного продукта, доставляемого в молекулярном виде и в составе кластеров относительно полной скоро-

сти роста  $K_i = (r_{ai} + r_{in})/r$ , где  $r = r_s + r_{ai} + r_{ss} + r_{nc}$ . Это отношение показывает степень химического загрязнения материала слоя побочным продуктом.

1.2. Показатель полиморфности выражается как доля скорости роста слоя за счет основного продукта в молекулярном виде и за счет кластерной фазы, доставляемого из потока, относительно полной скорости роста  $K_s = (r_{ss} + r_{nc})/r$ . Показатель отражает упорядоченность аморфной структуры слоя из-за нарушений вследствие встраивания в него кластеров и дезактивированных молекул продукта из газового потока.

1.3. Показатель неконформности отражает развитость поверхности слоя, а также его локальную неравномерность на элементах микрорельефа. Показатель включает в себя две составляющие, которые имеют разную природу.

Первая составляющая характеризует неконформность, которая имеет место при гетерогенном механизме роста, и отражает преобладание скорости диффузионной доставки реагента над скоростью его адсорбции  $K_{t1} = (r_g - r_a)/r_g$ . Здесь имеем в виду, что адсорбция определяет концентрацию реагента на поверхности, а, значит, и равномерность растущего слоя на микрорельефе. Учтем при этом поверхностную миграцию молекул реагента. Она протекает от точек первичной доставки молекул реагента на поверхности к местам на рельефе, имеющим меньшее заполнение. По нашим представлениям, относительно меньшее заполнение имеют области около элементов рельефа. Такие элементы как кластеры или микроступени подложки частично экранируют свои края и прилегающие области от диффузионного потока реагента и продуктов из объема пограничного слоя. Миграция реагента к экранированным участкам освобождает центры первичной адсорбции на более открытых участках. Вследствие этого на них происходит локальное увеличение адсорбции. Этот эффект может быть охарактеризован коэффициентом миграции ( $k_m$ ) как отношение расстояния миграции реагента к толщине растущего слоя, имея в виду, что с толщиной усугубляется и рельеф. Коэффициент можно представить иначе – как отношение времени релаксации ( $\tau_m$ ) тепловой энергии молекул падающих на поверхность к времени их химического превращения ( $\tau_r$ ). Тогда  $k_m = \tau_m / \tau_r = \tau_0 e^{Q_v/RT_s} / \tau_0 e^{E/RT_s} = e^{(Q_v - E)/RT_s}$ , где  $Q_v = iRT/2$  – молярная энергия молекул,  $i$  – число степеней свободы многоатомных молекул реагента. В результате, выражение для показателя неконформности по гетерогенной составляющей роста принимает вид:  $K_{t1} = (r_g - r_a k_m)/r_g$ .

Вторая составляющая топологической неоднородности отражает дополнительную неконформность, возникающую вследствие роста слоя по гомогенному механизму с диффузионной доставкой молекул готового продукта из потока  $K_{t2} = r_{ss}/r$ , где  $r$  – общая скорость роста по гетерогенному и гомогенному механизмам. Здесь пренебрегаем вкладом доставки материала кластеров в формирование профиля слоя, так как, по оценкам, его величина незначительна.

Общий показатель топологической неоднородности для смешанного механизма роста определим с учетом весовых вкладов гетерогенной и гомогенной скоростей роста  $-r_s/r$  и  $r_{ss}/r$ . Тогда показатель неконформности  $K_t = K_{t1}r_s/r + K_{t2}r_{ss}/r = (r_g - r_a k_m)r_s/r_g + (r_{ss}/r)^2$ .

## 2. Оценка условий роста в пограничном слое

Для расчета скоростей стадий и показателей неоднородности оценим режим течения газа у подложки, общую и эффективную толщину пограничного слоя, а также оценим преобладающий механизм роста для типичных условий процесса.

2.1. Режим течения газа у подложки и толщина пограничного слоя определяются критерием Рейнольдса  $Re = VL/\nu$ , где  $V$  – скорость потока газа,  $L$  – расстояние по подложке от начала потока,  $\nu$  – кинематическая вязкость газа. Для типичных условий осаждения, например, оксида кремния при давлении  $10^{-2}$  мм рт.ст.,  $V = 10^3$  см/с,  $L = 3-5$  см,  $\nu = 6$  см<sup>2</sup>/с, число Рейнольдса составляет  $Re = 2,2 \cdot 10^3$ . Это значение удовлетворяет критерию ламинарности потока  $Re < 2800$  [3], как условию, учитываемому настоящей моделью. В этих условиях толщина пограничного слоя, определяемая как  $\delta = 5L/Re^{1/2}$ , составляет 0,3–0,4 см.

2.2. Для расчета скоростей стадий необходимо определить эффективную толщину пограничного слоя, соответствующую координате максимума скорости образования продуктов в пограничном слое. Для температуры в пограничном слое примем линейное распределение  $T(y) = T_s - (T_s - T_v)y/\delta$ . Распределение реагента примем в параболическом приближении, так как падение его концентрации определяется не только диффузионным градиентом, но и потерями на химическую реакцию по пути диффузии к подложке  $G(y) = G_s + (G_v - G_s)(y/\delta)^2$ . Для модельного примера осаждения оксида кремния из моносилана значения  $T_s$ ,  $T_v$ ,  $G_v$ ,  $G_s$  даны на рис. 2. При исходной концентрации реагента на внешней границе газового слоя  $10^{16}$  см<sup>-3</sup> его расчетная концентрация непосредственно у поверхности подложки



оценена величиной  $C_s = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Анализ на экстремум функции скорости химической реакции  $r_{sv} = f[T(y/\delta), C(y/\delta)]$  (2-2.1) по нулевому значению ее производной дает относительную координату максимума  $y/\delta = 0,2$ , что при известном  $\delta = 0,3-0,4 \text{ см}$  соответствует абсолютному значению положения максимума  $\delta \approx 0,10 \text{ см}$ . Это значение толщины  $\delta$  определяет границу эффективной части газового слоя, от которой продукты реакции, имея максимальную концентрацию в этой области, диффундируют как к подложке, так и наружу за пределы газового слоя. Это обстоятельство учтено нами в выражениях для скоростей ряда стадий. Оценка скорости образования основного продукта ( $r_{sv}$ ) в трех зонах, а именно, у поверхности подложки, вблизи координаты  $\delta$  и на поверхности газового слоя показывает, как отмечалось выше, ее приблизительно симметричное распределение со значениями: подложки -  $r_{sv1} = 7 \cdot 10^{14}$ , вблизи  $\delta$  (точка максимума) -  $r_{sv2} = 6 \cdot 10^{16}$  и на поверхности газового слоя -  $r_{sv3} = 2 \cdot 10^{15} \text{ (см}^{-2} \text{ с}^{-1}\text{)}$ .

2.3. В общем случае слой может формироваться по гетерогенному механизму (ветвь 1), гомогенному (ветви 2 и 3) и смешанному механизму. В качестве оценочного индикатора преобладания того или другого механизма примем параметр  $\eta = t_v/t_s$  как отношение характерных времен химической реакции в газовом слое и на подложке, где  $t_v \sim \tau_v e^{-E/RT_v}$  и  $t_s \sim \tau_s e^{-E/RT_s}$ . Тогда  $\eta = (\tau_v/\tau_d) e^{(1/T_s - 1/T_v)E/R}$ , где  $\tau_v = L/V$  - среднее время пробега потока вдоль подложки,  $\tau_d = \delta^2/D_g$  - время диффузии реагента через пограничный слой,  $L$  - длина пробега потока у подложки,  $V$  - скорость потока на поверхности газового слоя,  $T_s$  и  $T_v$  - соответственно, температура подложки и средняя температура газового слоя. Так, для типичных условий осаждения оксида кремния, индикатор режима  $\eta$  составляет величину около единицы. Это указывает на смешанный механизм роста с выраженной гомогенной составляющей. В настоящей модели предусмотрен смешанный механизм, как общий случай процесса осаждения.

Исходные данные для оценки скорости стадий и показателей неоднородности слоев оксида кремния, получаемого по реакции моносилана с кислородом

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P	$T_s/T_v$	G	$\delta/\lambda$	$d_n$	$D_g/D_s/D_i$	$V_g/V_s/V_i$	$E/Q_g/Q_i$	$v_0$	$k_{gs}/k_{is}/k_{st}/k_z$
мм рт. ст.	К	$\text{см}^{-3}, \lg$	см	см	$\text{см}^2 \text{ с}^{-1}, 10^3$	$\text{см} \text{ с}^{-1}, 10^4$	ккал/моль	$\text{с}^{-1}, \lg$	отн. ед.
$10^{-2}$	700/600	14-16	0,1/0,01	$4,10^{-8}$	1,0/1,0/5,0	1,0/1,0/5,0	10/3,0/3,0	13	0,5/0,5/0,1/0,1

## ОЦЕНКА СКОРОСТЕЙ СТАДИЙ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

### 1. Исходные данные

В качестве апробации модели для конкретного процесса осаждения, оценим скорости стадий и показатели неоднородности слоев оксида кремния, получаемых из моносилана с кислородом. Типичный процесс осаждения проводится при давлении в реакторе  $10^{-1}-10^{-2} \text{ мм.рт.ст.}$  и температуре порядка 670-700 К. Моносилан ( $\text{SiH}_4$ ) имеет молярную энергию активации окисления при пониженном давлении около 10 ккал/моль [5], его теплота адсорбции, оцененная по энтальпии кипения, принята около 3 ккал/моль. Промежуточный продукт, преимущественно  $\text{SiH}_2$ , присутствующий в цепной реакции  $\text{SiH}_4$  с кислородом учитываем как исходный реагент. В расчетах используем классическое брутто-уравнение  $\text{SiH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ , где побочным продуктом являются молекулы воды. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 1.

### 2. Результаты расчетов и обсуждение

Основные результаты расчетов представлены графиками зависимости скоростей стадий роста, концентрации и размера кластеров, а также графиками зависимости показателей неоднородности от концентрации реагента (рис. 3-6). Общим для скоростей стадий роста основного продукта ( $\text{SiO}_2$ , рис. 3), побочного продукта ( $\text{H}_2\text{O}$ , рис. 4), продукта в виде кластеров (рис. 5), а также результирующих показателей неоднородности слоев (рис. 6) является их сильное изменение с концентрацией реагента.

#### 2.1. Скорости роста слоя по основному продукту.

Главным источником роста слоя является основной продукт, образующийся в молекулярной форме, гетерогенно ( $r_s$  - на подложке) и гомогенно ( $r_{ss}$  - в газовом слое).

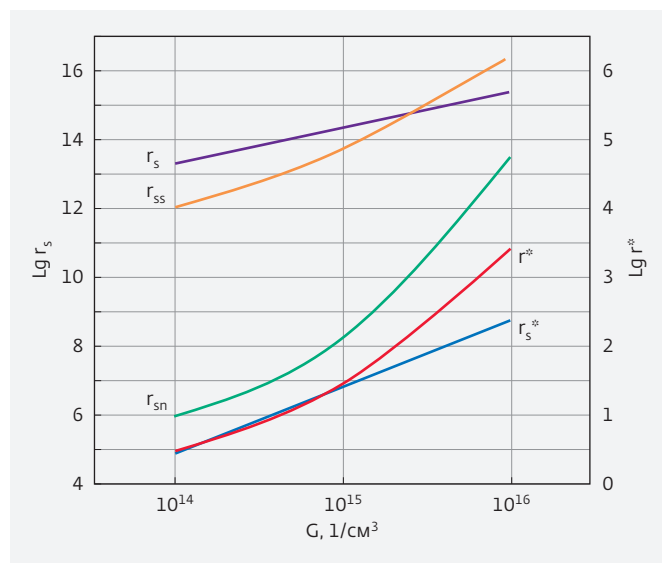
Гетерогенный механизм преобладает в диапазоне увеличения концентраций реагента до  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  (рис. 3). При более высоких концентрациях основным источником роста становится гомогенное образование продукта.

Для концентрации реагента около  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  скорость гомогенного роста становится примерно на порядок выше гетерогенного. В этих условиях общая скорость роста толщины ( $r$ ) составляет 3500 А/мин, в то время как гетерогенная составляющая ( $r^*$ ) не превышает 2600 А/мин. Для концентрации менее  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  скорость роста толщины определяется гетерогенной составляющей и не превышает 1500 А/мин. При гомогенном механизме создаются условия для формирования структурно несовершенного и менее плотного слоя. Это происходит в силу того, что молекулы продукта, возбужденные после экзотермической реакции быстро дезактивируются в газовых столкновениях (2-1.5). При этом, диффундируя к подложке, релаксированные в газе молекулы встраиваются в слой менее упорядоченно, в отличие от существенно более энергичных, образующихся в результате реакции на поверхности и встраивающихся в структуру слоя более упорядоченно. Наряду с разупорядочением структуры, при гомогенном механизме создаются условия для неравномерного роста слоя на рельефе подложки. Вместе с этим, значительным при гомогенном механизме становится рост слоя и за счет кластеров ( $r_{sn}$ ). При высокой концентрации реагента, около  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , эта

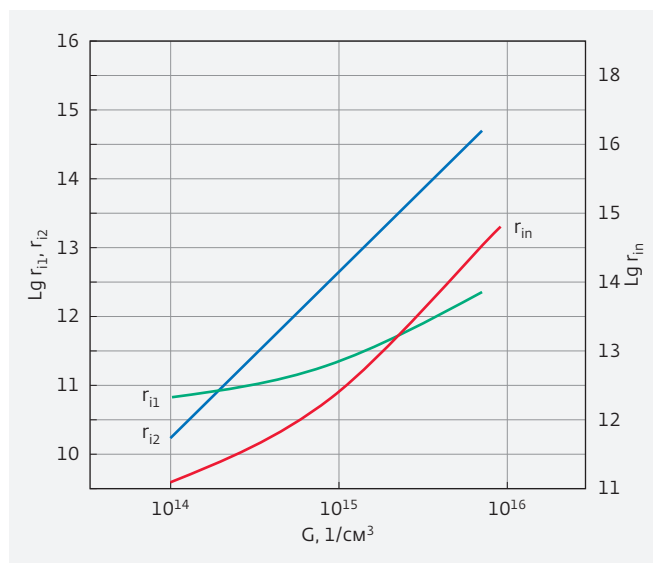
составляющая превосходит скорость молекулярного роста, что еще больше способно разупорядочивать структуру слоя. Однако с уменьшением реагента ниже  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , кластерная составляющая резко падает – до семи порядков на один порядок концентрации, и ее вклад в рост слоя становится несущественным. В этих условиях скорость роста за счет молекулярного материала кластеров не превышает  $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , в то время как общая скорость составляет более  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Эффективным путем подавления негативных гомогенных процессов является снижение температуры в пограничном слое. При этом концентрация продуктов в газовой фазе будет уменьшаться экспоненциально ( $e_2$  в 2-2.1, 2-3.3).

**2.2. Скорость образования побочного продукта.**

Для побочного продукта существенную роль играет его быстрый рост при высоких концентрациях реагента. Основной вклад имеет побочный продукт, образующийся в газовом слое, доставляемый к подложке в молекулярном виде ( $r_{i2}$ ) и в составе кластеров ( $r_{in}$ ) (рис 4). С уменьшением концентрации реагента роль обоих источников резко уменьшается, падая от значений, соответственно,  $3 \cdot 10^{15}$  и  $7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  до  $8 \cdot 10^{10}$  и  $1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . При этом доля указанных скоростей гомогенных составляющих побочного продукта от общей скорости гомогенного и гетерогенного роста ( $r_s$  и  $r_{ss}$ ) становится незначительной – около  $10^{-4}$  отн.ед. При низких концентрациях реагента основным источником загрязнения слоя побочным продуктом становится его образование за



**Рис. 3.** Скорости роста по основному продукту:  $1/\text{см}^2\text{с}$ :  $r_s$  – гетерогенно,  $r_{ss}$  – гомогенно,  $r_{sn}$  – в кластерах; А/мин:  $r_s^*$  – гетерогенно,  $r^*$  – по всем ветвям



**Рис. 4.** Скорости захвата побочного продукта,  $1/\text{см}^2\text{с}$ :  $r_{i1}$  – гетерогенно,  $r_{i2}$  – гомогенно,  $r_{in}$  – в составе кластеров

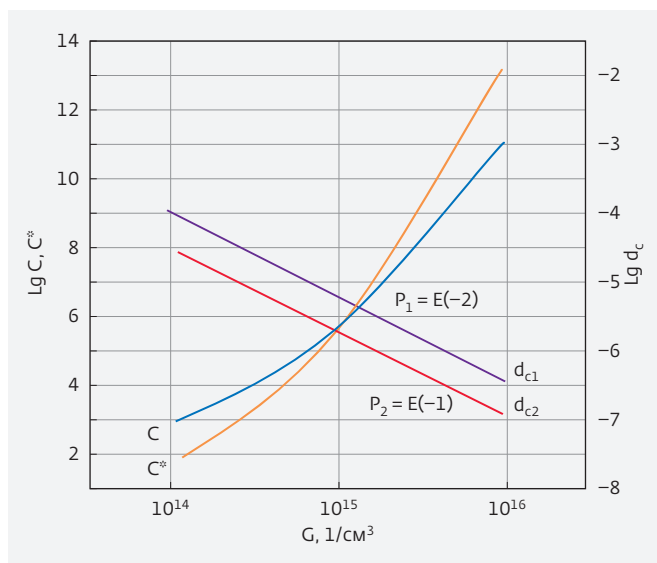
счет реакции на подложке ( $r_{il}$  в сравнении с  $r_{i2}$  и  $r_{in}$ ). Как способ уменьшения концентрации побочного продукта в газовом слое и на подложке является, соответственно, снижение температуры газового слоя (влияние по обратной экспоненте  $e_2$  в 2-2.4) и уменьшение адсорбции продукта повышением температуры подложки (уменьшение  $I_s$  за счет экспоненты  $e_1$  по 3-3.2).

**2.3. Концентрация и размеры кластеров.** С ростом концентрации реагента размер кластеров ( $d_c$ ) быстро уменьшается с максимального 3200 Å до 55 Å (рис. 5). Сильное уменьшение размеров кластеров с ростом концентрации реагента обусловлено опережающей убылью основного и побочного продуктов вследствие интенсивного зародышеобразования и увеличения количества кластеров. При увеличении реагента с  $10^{14}$  до  $10^{16}$   $\text{см}^{-3}$  концентрация кластеров в пограничном слое возрастает от  $6,4 \cdot 10^3$   $\text{см}^{-3}$  (размер 3200 Å) до  $3,2 \cdot 10^{10}$   $\text{см}^{-3}$  (размер 55 Å). При неизменной концентрации реагента, размер кластеров уменьшается с ростом давления в реакторе. С увеличением давления от  $10^{-2}$  до  $10^{-1}$  мм рт.ст., когда время диффузии продуктов реакции растет из-за падения коэффициента диффузии, расчетные размеры кластеров уменьшаются, соответственно, до 1300 при концентрации реагента.

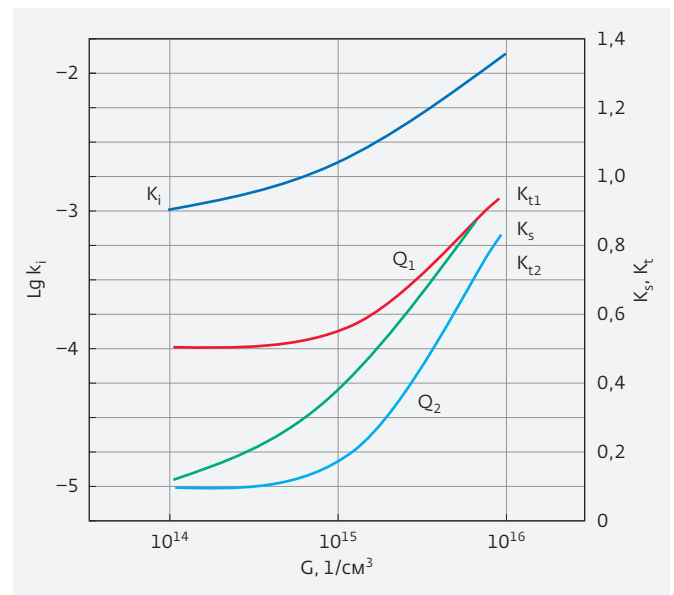
Критический размер кластеров, способных диффузией достичь подложки, не будучи вынесенными потоком (выражение 2-3.16) при скорости потока  $V \approx 0,3V_v$  в активной области ( $V_v$  – скорость потока вне

пограничного слоя),  $d_c^* = 44$  Å (около 10-11 размеров молекул  $\text{SiO}_2$ ). С учетом рассчитанных  $k$  (по 2-3.16) концентрация кластеров, размером не более критического, содержащихся в осажденном слое составляет от  $10^2$  до  $10^{20}$   $\text{см}^{-3}$  для рассматриваемого диапазона концентраций реагента. При этом поверхностная концентрация кластеров  $C^*$  на растущем слое составляет от  $10^2$  и  $10^5$   $\text{см}^{-2}$  для концентраций реагента  $10^{14}$  и  $10^{15}$   $\text{см}^{-3}$  и  $10^{12}$   $\text{см}^{-2}$  для концентрации реагента  $10^{16}$   $\text{см}^{-3}$  (рис. 5, зависимость  $C^*$ ). Низкая концентрация кластеров при малых значениях реагента, когда формируются кластеры большого размера (зависимость  $d_c$ ), указывает на их практически полный вынос потоком. Это объясняет факт относительно невысокой дефектности слоев по микрочастицам даже при значительном количестве частиц, обнаруживаемых в газовой фазе [12]. Очевидно, помимо нарушений структуры, встроенные кластеры способны развивать поверхность слоя в виде множественных локальных неровностей величиной порядка размеров самих кластеров.

**2.4. Значения показателей неоднородности слоев.** Показатели химической, структурной и топологической неоднородности, количественно отражающие степень примесности ( $K_i$ ), полиморфности ( $K_s$ ) и неконформности ( $K_t$ ) слоев, возрастают (характеристики ухудшаются) с ростом концентрации реагента (рис. 6), что закономерно с развитием гомогенных процессов.



**Рис. 5.** Концентрация кластеров в газе -  $C$  ( $1/\text{см}^3$ ) и на поверхности слоя -  $C^*$  ( $1/\text{см}^2$ ); размер кластеров -  $d_c$  (см) при давлении в реакторе  $p_1$  и  $p_2$  (мм рт. ст.)



**Рис. 6.** Показатели (отн. ед.) примесности -  $K_i$ , полиморфности -  $K_s$  и неконформности -  $K_{t1}$  и  $K_{t2}$  ( $Q_1 = 3$ ,  $Q_2 = 6$ , ккал/моль)

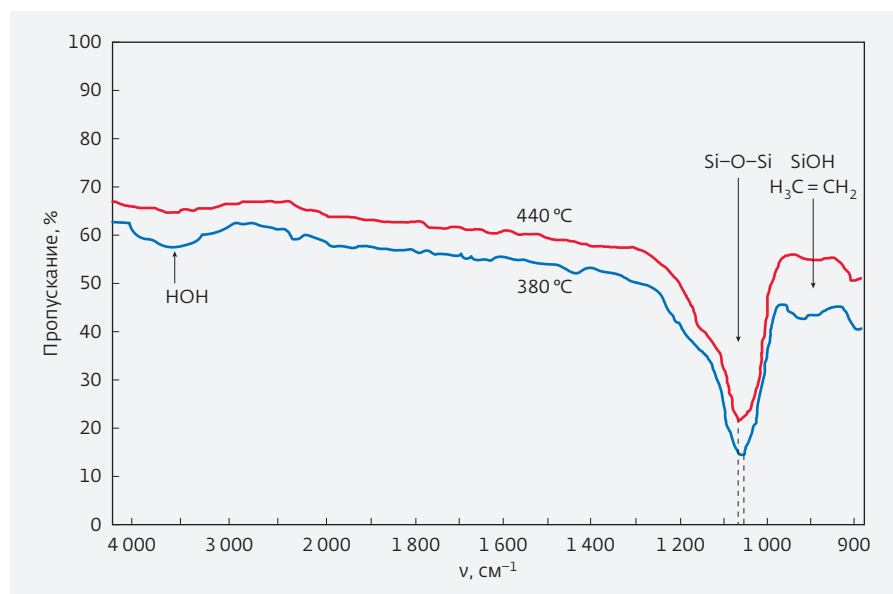


Рис. 7. Инфракрасные спектры слоев  $\text{SiO}_2$ , осажденных из  $\text{SiH}_4$  (верхний) и из  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  (нижний)

2.4.1. Показатель примесности  $K_i$ , имеет значительную величину, около  $10^{-3}$ , даже в области низких концентраций реагента, когда гомогенные процессы подавлены. Это обусловлено значительным образованием побочного продукта на подложке по первой ветви роста. Примесность может быть уменьшена подавлением реадсорбции ( $r_{il}$ ) путем повышения температуры подложки (уменьшением  $I_s$  по 3-3.2), а также сокращением времени потокового выноса (2-1.5) посредством увеличения скорости потока. По нашим экспериментальным данным, содержание воды в слоях, осажденных из моносилана при 670 К, оцениваемое по относительной площади пика инфракрасного спектра поглощения вблизи  $3600 \text{ см}^{-1}$ , может составлять сотые и даже десятые доли процента (рис. 7).

По данным масс-спектрометрического исследования [11], содержание воды в газовой фазе может достигать концентрации исходного реагента ( $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ). Это обуславливает загрязнение слоя не только водой, но и силанольными группами (Si-OH), образующимися в результате побочных реакций. Пик поглощения Si-OH находится вблизи  $3400 \text{ см}^{-1}$  (на приведенном спектре накладывается на пик воды). Примесность существенно зависит от типа применяемого реагента. Так, при осаждении оксида кремния окислением тетраэтоксисилана -  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  (рис. 7, нижний спектр) содержание воды существенно больше, чем для слоев из моносилана. Это обусловлено стехиометрически значительным количеством обра-

зующейся воды в результате окисления большой кремний-органической молекулы. Особенностью применения этого реагента при низкотемпературном осаждении является загрязнение слоя и другим побочным продуктом в виде органических групп. Это обнаруживается по полосе поглощения вблизи  $900 \text{ см}^{-1}$ .

2.4.2. Показатель полиморфности  $K_s$  определяется характером зависимости скоростей гомогенного ( $r_{ss}$  и  $r_{sn}$ ) и гетерогенного ( $r_s$ ) роста. При концентрации реагента  $< 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , когда основным является гетерогенный рост ( $r_s \gg r_{ss} \gg r_{sn}$ ), создаются условия для роста мономорфного (однофазно аморфного) слоя, так как он формируется в основном за счет реакции на подложке без существен-

ной доставки продуктов из газового слоя, способных нарушать ближний порядок аморфной структуры. В практическом случае, когда требуется достаточно высокая скорость роста, слои выращенные из моносилана имеют выраженную полиморфную структуру, определяемую кластерами (рис. 8).

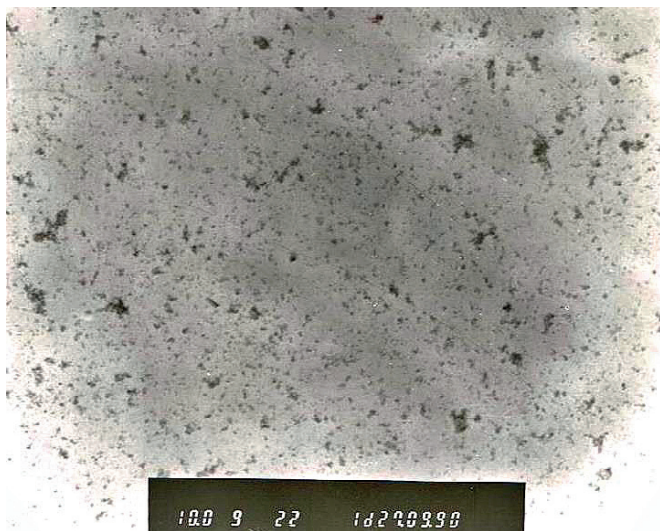
По оценкам [13] и нашим данным исследования на атомно-силовом микроскопе, средний размер фрагментов структуры таких слоев составляет 100-120 А. При осаждении в условиях повышенного давления в реакторе [12], когда образование частиц наиболее интенсивно, размер частиц превышает 0,1 мкм, их концентрация в газовой фазе достигает  $10^5 \text{ см}^{-3}$ , а выступы на поверхности имеют величину порядка толщины слоя. По нашим данным, для слоев, осажденных в режиме выраженного гомогенного роста при давлении в реакторе, близком к атмосферному, когда скорость потокового выноса кластеров незначительна, их размеры составляют от  $10^{-6}$  до  $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}$  (рис. 9).

Для подавления образования кластеров и микрочастиц необходимо снижение давления и концентрации реагентов, а также снижение температуры в пограничном слое.

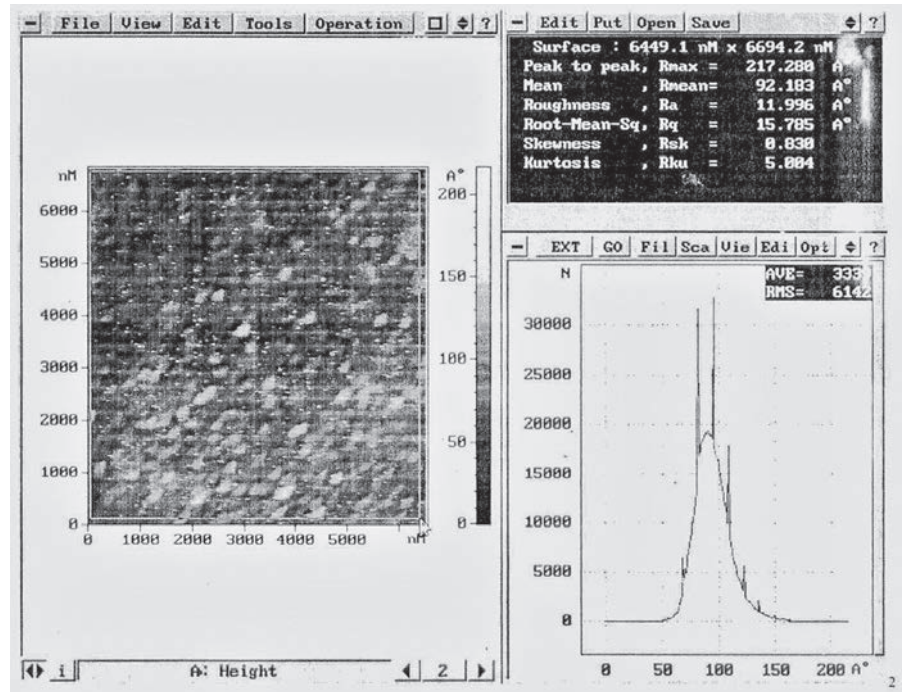
2.4.3. Топологическая неоднородность слоев становится существенной при высоких концентрациях реагента. Это происходит вследствие решающего влияния составляющей  $K_{t2}$  (4-1.3), которая определяется доставкой продуктов из газового объема (гомогенный механизм). В этом случае общий пока-

затель топологической неоднородности  $K_t$  достигает величины 0,89 ед. Столь значительная неравномерность толщины при гомогенном росте определяется принципиальной неравномерностью процесса диффузионной доставки продуктов, определяющей скорость роста в различных точках рельефа.

Диффузия к выступающим элементам поверхности, таким как микроступеньки структуры подложки или кластеры на ней, протекает быстрее, чем к частично экранированным краям и прилегающим участкам микро рельефа. В таких условиях, когда роль гетерогенного механизма и миграции реагента незначительна, расчетная толщина слоя на микроступеньке в нижней точке уступа составляет лишь  $1,00 - 0,89 = 0,11$  ед. от толщины в верхней точке. Однако с уменьшением давления топологическая неоднородность все более контролируется составляющей  $K_{cl}$ , отражающей роль скорости адсорбции над скоростью доставки реагента. С уменьшением концентрации реагента от  $10^{15}$  до  $10^{14}$  см<sup>-3</sup> адсорбция и химиче-



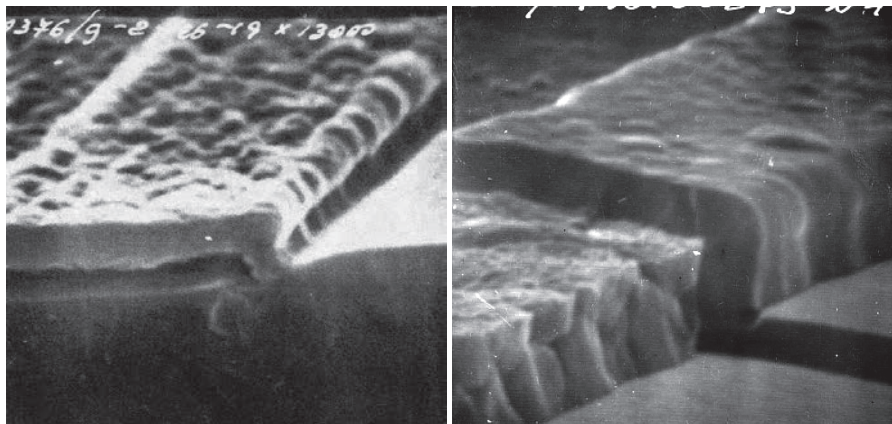
**Рис. 9.** Кластеры в слое SiO<sub>2</sub> – толщина слоя 0,3 мкм, размеры кластеров: max  $3 \cdot 10^{-5}$  см, min  $10^{-6}$  см (трансмиссионная электронная микроскопия, увеличение 10 000x разрешение 20 нм)



**Рис. 8.** Морфология поверхности слоя SiO<sub>2</sub>, осажденного из SiH<sub>4</sub> (атомно-силовой микроскоп)

ская реакция преобладают над доставкой реагента, и показатель неоднородности уменьшается (равномерность на рельефе улучшается). Решающим для показателя неоднородности становится значение коэффициента миграции реагента, входящего в  $K_{cl}$  (4-1.3). Так, для моносилана при его теплоте адсорбции около 3 ккал/моль и расчетном коэффициенте миграции  $k_m = 7 \cdot 10^{-3}$  общий показатель неоднородности  $K_t$  с учетом веса  $K_{cl}$  быстро уменьшается (равномерность улучшается). Однако величина показателя неоднородности, даже уменьшившись примерно в 1,5 раза, в смешанном режиме гетерогенно-гомогенного роста остается значительной и составляет 0,51 ед. В то же время при использовании, например, дисилана или тетраэтоксисилана, с их более высокой теплотой адсорбции ( $\approx 6-7$  ккал/моль, оценено с учетом  $i$ , см. 4-1.3) и их расчетным коэффициентом миграции  $k_m = 6 \cdot 10^{-2}$  показатель неоднородности не превышает 0,10 ед. Это соответствует практически равномерному профилю слоя на рельефе подложки. На рис. 10 представлены фото характерных профилей слоев, осажденных в сопоставимых условиях из моносилана и тетраэтоксисилана, имеющих близкие энергии активацию окисления и существенно отличающиеся теплоты адсорбции.

Рост слоя в режиме ограничения кинетикой на поверхности при высокой миграции реагента имеет



**Рис. 10.** Профили слоев  $\text{SiO}_2$ , осажденных из  $\text{SiH}_4$  (слева) и из  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  (справа) (растровый электронный микроскоп, высота микроступеньки 0,8 мкм)

решающее значение для формирования конформного профиля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана молекулярно-кинетическая модель процесса осаждения слоев из газовой фазы. Модель позволяет оценить скорости различных стадий процесса и базовые характеристики слоев. Показатели примесности, полиморфности и неконформности, предусматриваемые моделью, отражают степень химической, морфологической и топологической неоднородностей слоев и определяются соотношением скоростей гомогенного и гетерогенного образования продуктов химической реакции. Моделирование показывает решающую зависимость скоростей стадий и значений показателей неоднородностей от соотношения величин энергии активации и теплоты адсорбции основного и побочного продуктов, а также от скоростей диффузионной доставки молекулярных продуктов и кластеров в пограничном газовом слое.

2. В соответствии с моделью, анализ процесса осаждения  $\text{SiO}_2$  из  $\text{SiH}_4$  показывает, что в предпочтительных условиях процесса при концентрациях реагента  $\leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и давлении в реакторе  $10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$  характерные значения показателей неоднородностей составляют: примесность по  $\text{H}_2\text{O}$  – 0,1–0,15%, полиморфность по включению дезактивированной фазы  $\text{SiO}_2$  –  $(1,0-1,3) \cdot 10^{-3}\%$  и неконформность из-за массоподвода 10–30%. При этом размер и концентрация кластеров в газовой фазе составляют, соответственно,  $7 \cdot 10^{-6}$ – $2 \cdot 10^{-7} \text{ см}$  и  $1 \cdot 10^{13}$ – $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а поверхностная концентрация кластеров размером 40–150 Å, не вынесенных потоком составляет  $10^2$ – $10^5 \text{ см}^{-2}$ .

3. Апробация модели, проведенная на примере процесса осаждения  $\text{SiO}_2$  показывает удовлетворительное соответствие модельных расчетов с экспериментальными данными. Модель позволяет прогнозировать и количественно сопоставлять базовые характеристики слоев, осаждаемых в различных условиях процессов.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликт интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Красников Г.Я., Зайцев Н.А.** Физико-технологические основы обеспечения качества СБИС. Ч. 1. – М., 1999. С. 211–213.
2. **Красников Г.Я.** Физико-технологические принципы и методы обеспечения качества КМОП БИС массового производства // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МИЭТ, 1996.
3. *Chemical Vapor Deposition of Inorganic Thin Films in Thin Film Processes.* Kern W and Ban, W.S. / Academic Press, New York, 1978. P. 257–331.
4. *Handbook of chemical vapor deposition,* Hugh O. Pierson / Academic Press, Pennington, N J, 1992. P. 26–34.
5. **Васильев В.Н., Репинский С.М.** Осаждение диэлектрических слоев из газовой фазы // Успехи химии. 2005. 74. P. 452–483.
6. **Rosenberger F.** Flow Dynamics and Modelling of CVD, Proc 10<sup>th</sup> Int Conf on CVD, JElectrochem. Soc./ Pennington, NJ, 1987. P. 193–203.
7. **Cobianu C. and Rovelescu C.** A Theoretical Study of the Low – Temperature CVD of  $\text{SiO}_2$  Films // Electrochem.Soc.1983. Vol. 130. № 9. P. 1888–1893.
8. **Morosanu C. and Segal E.** Mechanism of the CVD of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  films from  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  and  $\text{NH}_3$  under diffusion controlled conditions / Thin Solid Films. 1982 (91). № 3. P. 251–256.
9. **Vasilyeva L.L., Drozdov V.N., Repinsky S.M. and Svitashv K.K.** Deposition of Silica Films by The Oxidation of Silane in Oxygen / Thin Solid Films. 1978. 55. P. 221–228.

10. **Arora R. and Pollard R.** A Mathematical Model For The Coupled Reaction Kinetics And Transport Processes in CVD Systems / Department of Chemical Engineering, University of Houston, 1987. P. 106-112.
11. **Tobin P., Price J. and Kempbell L.** Gas Phase Composition in the Low Pressure CVD of Silicon Dioxide // J. Electrochem. Soc., 1980. Vol. 127. № 10. P. 2222-2227.
12. **Shintany A., Suda K., Suzuki M., Maki M. and Takami K.** SiO<sub>2</sub> Particulates Dispersed in CVD Reactor / J. Electrochem. Soc., 1977. Vol. 124. № 11. P. 1771-1776.
13. **Евдокимов В.Л.** Модель процесса химического осаждения слоев из газовой фазы // Электронная промышленность. 1994. 6. P. 136.
14. **Евдокимов В.Л.** Закономерности формирования профиля слоев, осаждаемых из газовой фазы // Материалы 7-й отраслевой конференции МЭП «Тонкие пленки в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем», 1990. P. 127.

# SILVACO TCAD КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ

► И. А. Лысенко, Д. Д. Зыков, Е. В. Анищенко, Н. Ю. Хабибулина  
ТУСУР

Представлен краткий обзор программного обеспечения для моделирования фотолитографии. Описаны теоретические основы и особенности создания моделей данного технологического процесса в программном пакете Silvaco TCAD. Рассмотрены основные возможности модуля Optolith. Приведены результаты компьютерного моделирования различных этапов литографического процесса, рассмотрены факторы, влияющие на формирование изображения. Особое внимание уделено исследованию оптических явлений, сопровождающих процесс фотолитографии.

## SILVACO TCAD AS A TOOL FOR PHOTOLITHOGRAPHY SIMULATION

I.A. Lysenko., D.D. Zykov, E.V. Anishchenko, N.Yu. Habibulina  
TUSUR

A brief overview of photolithography simulation software is presented. The theoretical foundations and peculiarities of the technological process simulation in Silvaco TCAD are described. The main features of Optolith module are considered. The computer simulation results of lithographic process various stages are presented, the factors affecting the formation of image are considered. Special attention is paid to the study of optical phenomena accompanying the photolithography.

## АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ TCAD

Приставка «нано-» успешно вошла в современный мир и стала неотъемлемой частью нашей жизни. Многочисленные научные и инженерные разработки ведутся в направлении усовершенствования процесса производства GaAs и GaN интегральных микросхем, сохраняя тенденцию к созданию элементов со сверхмалыми размерами. Ключевым этапом современной технологии изготовления микросхем является фотолитография, так как именно она является фактором, определяющим критические размеры формируемых элементов. На долю фотолитографии приходится около половины производственных затрат, а ее отработка и оптимизация при помощи эмпирических методов является довольно трудоемким процессом. Упростить данную задачу помогают набирающие все большую популярность средства приборно-технологического моделирования, позволяющие проводить процесс в виртуальном пространстве. На начальных стадиях разра-

ботки технологии моделирование применяется для построения общей картины понимания оптических явлений, возникающих при экспонировании, а также для исследования сложных физико-химических явлений, происходящих в слое фоторезиста. В дальнейшем инструменты TCAD применяются для анализа и оптимизации процесса фотолитографии, а также более быстрой отработки технологических режимов.

К сожалению, ни один инструмент для технологического моделирования процесса фотолитографии не сможет обеспечить 100%-ное совпадение модели с реальными данными, полученными опытным путем, для всех возможных условий процесса. Создание адекватной модели фотолитографии является довольно нетривиальной задачей, сопряженной с некоторыми проблемами. Математическое представление физико-химических процессов, происходящих в фоторезисте во время экспонирования и проявления, является довольно сложным в опи-



сании и в программных продуктах представлено не точно, с применением эмпирических величин и приближений. Кроме того, нет такого программного средства, в котором бы учитывались абсолютно все факторы, влияющие на процесс формирования изображения. Помимо несовершенства программных инструментов, трудности часто возникают при создании самих моделей. Во многих случаях при моделировании требуется задание оптических констант и других величин, характеризующих используемые материалы. Данные величины не всегда легко найти в литературных источниках, часто они не могут быть измерены напрямую. Калибровка подобных моделей также является довольно трудоемкой и нетривиальной задачей, требующей определенных знаний и умений. Все эти факторы значительно усложняют компьютерное моделирование.

Однако несмотря на все трудности и ограничения, грамотное использование программных инструментов для моделирования фотолитографии позволяет получать корректные результаты, хорошо согласующиеся с реальными экспериментами.

Целью настоящей работы является обзор существующих программных средств для приборно-технологического моделирования фотолитографии, а также изучение возможностей и особенностей моделирования данного технологического процесса в программном пакете Silvaco TCAD.

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ

На настоящий момент известно множество программных продуктов для создания моделей фотолитографического процесса. Среди них можно выделить такие, как Lythogra, OptoLith, Prolith, Metropole, Sample, Depict, S-Litho, Solid-C и др. [1]. Многие из них представляют собой университетские разработки, созданные аспирантами и их научными руководителями. В дальнейшем они послужили основой для создания более сложных инструментов, часть из которых была приобретена крупными компаниями и вошла в состав мощных многофункциональных программных пакетов для приборно-технологического моделирования. Основными мировыми лидерами и конкурентами в области разработки программного обеспечения для приборно-технологического моделирования являются американские компании Silvaco (Silvaco TCAD) и Synopsys (Sentaurus TCAD), предлагающие наиболее интересные и разнообразные возможности для моделиро-

вания литографического процесса в субмикронном диапазоне [2], [3].

В данной статье будет рассмотрен программный комплекс, разработанный компанией Silvaco. Программный пакет имеет модульную архитектуру и, помимо фотолитографии, представляющей модуль Optolith, позволяет проводить моделирование других операций технологического процесса формирования элементов интегральных схем, включая травление, осаждение, ионную имплантацию, окисление, диффузию и другое. Помимо технологического моделирования, продукт представляет возможности для создания моделей микроэлектронных приборов и их электрофизических параметров. Работа программного инструмента основана на оптических, физических и химических явлениях, происходящих в интегральной структуре в процессе ее формирования, выраженных с помощью математического языка. Решение системы дифференциальных уравнений, описывающих поведение изучаемого объекта или процесса, происходит с использованием численных методов, при этом вся геометрическая область моделирования разбивается на конечное число узлов, в которых и проводится расчет искомых величин.

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ В SILVACO TCAD

Моделирование оптической литографии является довольно нетривиальной задачей, характеризующейся большим набором различных параметров. Пользователю при этом необходимо задать набор определенных команд и их параметров, описывающих реальный технологический маршрут. В целом весь процесс моделирования фотолитографии можно разделить на несколько этапов.

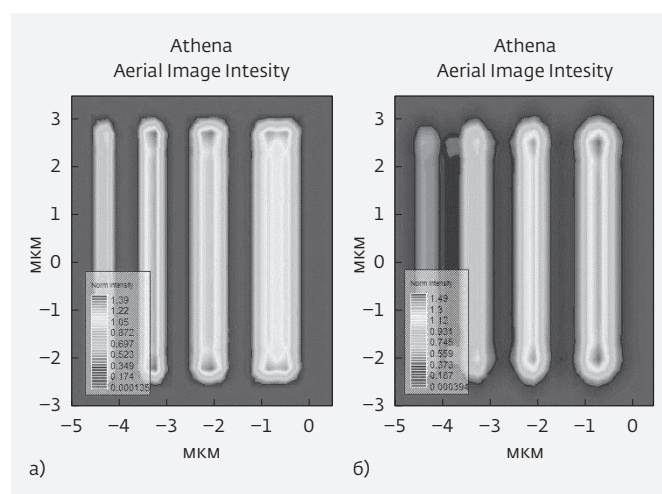
### Формирование «воздушного» изображения

На первом этапе происходит расчет распределения интенсивности светового потока на поверхности пластины и формирование «воздушного» изображения (aerial image). Для этого пользователю необходимо задать информацию о параметрах оптической установки, а также характеристиках фотошаблона и подложки. При исследовании контактной фотолитографии значение имеют такие параметры, как длина волны излучения ( $g$ ,  $h$ ,  $i$ , DUV, широкополосное), конфигурация шаблона, степень прозрачности его защитного слоя, зазор между шаблоном и фоторезистом. При создании модели проекционной литографии необходимо указать также число-

вую апертуру объектива, дефокусировку изображения. В основе подхода, используемого программным алгоритмом для расчета распределения света, лежат научные труды Хопкинса [4], который внес большой вклад в исследование процессов дифракции в оптических системах.

Сформированное на данном этапе распределение интенсивности света может быть полезным при анализе искажения формы элементов, несимметричности, контраста изображения, изменения размеров вследствие эффекта близости и др. Кроме того, интерес представляет исследование влияния параметров проекционной установки, в том числе числовой апертуры, длины волны и др. на формируемое изображение. Еще одной оригинальной возможностью, предоставляемой программным пакетом, является моделирование влияния aberrаций проекционного объектива на формирование фотолитографического рисунка.

Применение модуля Optolith позволяет не только исследовать влияние отдельных видов aberrаций (астигматизм, кома, сферическая aberrация, дисторсия, кривизна поля изображения, дефокусировка и др.), а также их комбинаций на формируемый рисунок схемы, но и создавать «воздушное» изображение виртуальными проекционными объективами с различным набором aberrаций [5]. На рис. 1 представлено распределение интенсивности света через фотошаблон на поверхности пластины при двух различных значениях дефокусировки изображения. Для получения данных изображений здесь и далее в модель были заложены следующие параметры проекционной установки:  $i$ -line,  $NA = 0,6$ , форма



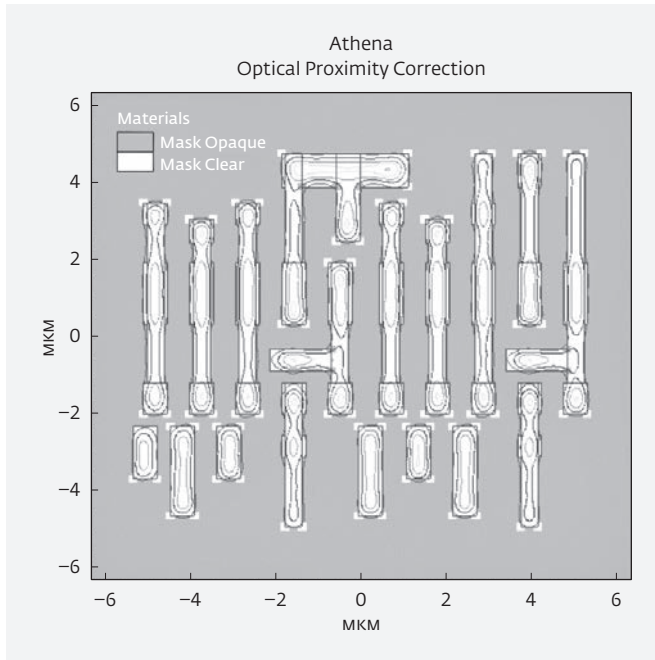
**Рис. 1.** Распределение интенсивности света на поверхности пластины: а – defocus=0; б – defocus=1

источника излучения круглая. Значения дефокусировки (defocus): 0 и 1. Видно, что при значении defocus=1 наблюдается скругление краев и изменение размеров элементов, тогда как при нулевом значении данного параметра края элементов становятся более четкими.

Главным фактором, ограничивающим процесс миниатюризации элементов на схеме с использованием фотолитографии, является дифракция, возникающая при прохождении света через рисунок фотошаблона, элементы которого расположены на расстоянии, меньшем длины волны экспонирующего излучения [6]. При этом соседние элементы на схеме могут стать неразличимыми. Для уменьшения влияния данного эффекта были разработаны специальные методы увеличения разрешающей способности оптической системы, позволившие уменьшить критический размер элементов на схеме.

Отработка параметров и режимов применения данных методов на практике является довольно трудоемким процессом, требующим проведения множества эмпирических исследований. Дополнительным инструментом, позволяющим исследовать методы получения изображений высокого разрешения, являются современные программные средства для моделирования литографии. В частности, в Silvaco TCAD доступны такие методы, как внеосевое освещение, применение фазосдвигающих шаблонов, коррекция оптического эффекта близости и прочее.

Довольно известным является метод внеосевого освещения, предполагающий использование источников излучения сложной формы (shrink, анулярное и др.). Угол падения светового потока в этом случае выбирается таким образом, чтобы соседние линии освещались лучами с противоположными фазами, что приводит к уменьшению минимального размера и повышению глубины фокуса проекционной системы. В основе работы фазосдвигающих фотошаблонов также лежит подавление дифракции излучения за счет фазового сдвига проходящего света, который обеспечивается изменением фазы излучения на  $180^\circ$  в определенных областях маскирующего слоя шаблона. Данный метод позволяет увеличить крутизну стенок элементов скрытого изображения и таким образом повысить разрешающую способность фотолитографии до 40%. Наиболее простым способом повышения разрешения является коррекция оптического эффекта близости, которая заключается в модификации рисунка фотошаблона, обеспечивая тем самым более точную пере-



**Рис. 2.** Фотошаблон с коррекцией эффекта оптической близости

дачу формы и размеров элементов на полупроводниковой пластине.

Возможности для создания фазосдвигающих фотошаблонов и шаблонов с коррекцией оптической близости, а также поиска их оптимальных конфигураций предоставляет специальный графический редактор MaskViews, входящий в состав программного пакета. На рис. 2 показан пример фотошаблона с коррекцией оптической близости, разработанного в Silvaco TCAD [7]. Наглядное сравнение топологии фотошаблона и сформированного «воздушного» изображения позволило вычислить области, наиболее критичные к искажению и нуждающиеся в коррекции. С этой целью в рисунок шаблона были введены дополнительные элементы – серифы, что впоследствии поможет решить проблемы со скруглением краев элементов и неравномерностью ширины линий.

### Моделирование «скрытого» изображения в слое фоторезиста

На следующем этапе на основе полученного «воздушного» изображения происходит формирование «скрытого» изображения (latent image) в структуре фоторезиста. При этом рассчитываются физико-химические процессы, происходящие внутри фоторезиста в результате воздействия на него актиничного света. Большой вклад в развитие данной

области моделирования внес Рик Дилл [8], предположивший, что концентрация ингибитора в определенный момент времени является функцией так называемых параметров А, В, С, описывающих процесс поглощения света в пленке фоторезиста и его оптическую чувствительность. Расчет распределения интенсивности излучения и, следовательно, концентрации фоточувствительного компонента в пленке резиста происходит посредством численного решения уравнений Гельмгольца, для чего необходимы знания толщины и оптических констант фоторезиста и расположенных под ним слоев.

Большое влияние на внешний вид «скрытого» изображения оказывает ряд оптических явлений, возникающих в слое фоторезиста в процессе экспонирования. К ним можно отнести отражение, дифракцию, интерференцию светового пучка, рассеяние электромагнитной волны в непланарной структуре и другие явления, приводящие к некоторым нежелательным оптическим эффектам и ухудшению качества получаемого рисунка. В качестве примера подобных эффектов можно привести образование стоячих волн, а также нелинейную зависимость дозы экспонирования, необходимую для полного проявления фоторезиста  $E_0$  (dose to clear), от толщины резиста (колебательные кривые).

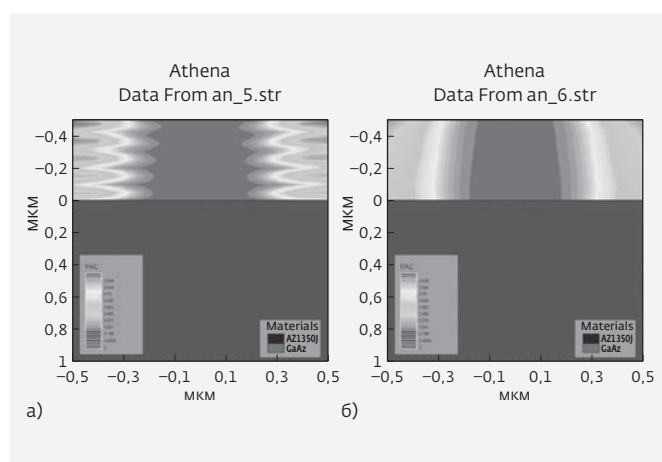
Стоячими волнами называют колебания интенсивности излучения по глубине слоя фоторезиста, имеющие периодический характер. Причиной возникновения данного эффекта является интерференция падающей и отраженной от границы раздела фоторезист-пластины световых волн, что приводит к возникновению максимумов и минимумов интенсивности света внутри пленки резиста. Образованный в результате этого волнистый край проявленного профиля фоторезиста значительно ухудшает контроль размеров и формы элементов схемы.

Нелинейная зависимость дозы экспонирования  $E_0$  (dose to clear) от толщины резиста обусловлена взаимодействием световых волн, отраженных от верхней и нижней границ пленки фоторезиста. Данная зависимость определяется количеством отраженного и поглощенного пленкой излучения и представляет собой колебательную кривую, затухающую по мере увеличения толщины фоторезиста. Негативным последствием является большой разброс размеров элементов в результате относительно небольших колебаний толщины фоторезиста, что на практике встречается довольно часто. Для наглядного представления данного эффекта также используются колебательные кривые, отображающие зави-

симость критического размера элементов и коэффициента отражения от толщины слоя фоторезиста.

Известными методами борьбы с рассмотренными негативными эффектами на практике являются подбор оптимальной толщины фоторезиста, применение верхних и нижних антиотражающих покрытий, выбор подходящего материала подложки и др. В случае образования стоячих волн также помогает проведение постэкспозиционной сушки фоторезиста (ПЕС). Для внедрения описанных методов минимизации нежелательных оптических эффектов в реальную технологию требуется проведение многочисленных экспериментов для подбора оптимальных параметров технологического процесса и отработки режимов, что упрощается с применением средств приборно-технологического моделирования. Silvaco TCAD предлагает возможности для моделирования всех представленных выше методов борьбы с негативными эффектами, влияющими на формирование «скрытого» изображения. На рис. 3 представлено распределение фотоактивного компонента (РАС) в слое фоторезиста после экспонирования с выраженным эффектом стоячих волн до и после проведения постэкспозиционной сушки.

Видно, что данная операция положительно повлияла на формируемый профиль фоторезиста, сгладив неровные края изображения в результате диффузии вещества. Помимо распределения фотоактивного компонента, в программном пакете доступно также отображение распределения интенсивности света внутри пленки фоторезиста при экспонировании.



**Рис. 3.** Распределение фотоактивного компонента в слое фоторезиста: а – до проведения ПЕС; б – после проведения ПЕС

Результаты моделирования другого известного метода борьбы с нежелательными оптическими эффектами представлены на рис. 4. В данном случае в технологический процесс была введена дополнительная операция нанесения антиотражающего покрытия поверх слоя фоторезиста (TARC). Ширина окна в фотошаблоне, заложенная в программном пакете, составила 4 мкм. Можно заметить, что с применением данного метода амплитуда колебательной кривой зависимости размера элемента от толщины фоторезиста стала значительно меньше.

### Проявление фотолитографического изображения

Следующим этапом после получения «скрытого» изображения является моделирование проявления фоторезиста как процесса локально-селективного растворения, зависящего от химических свойств резиста и проявителя. При этом свойства проявителя задаются косвенным образом, посредством спецификации особых параметров фоторезиста, что дает возможность рассчитать скорость проявления фоторезиста в любой момент времени в местах с разной концентрацией РАС. В Silvaco TCAD предложены несколько моделей проявления фоторезиста, разработанные исследователями в данной области: Dill, Kim, Mack, Trefonas, Hirai, каждая из которых имеет свои особенности [9]. Все модели описываются определенными математическими выражениями, связывающими концентрацию ингибитора и скорость проявления фоторезиста и требуют от пользователя знания скорости проявления экспонированного и неэкспонированного резиста, чувствительности к проявителю, пороговой концентрации фотоактивного компонента и других величин. Выходной информацией является профиль фоторезиста после проявления.

Кроме того, в модуле имеются возможности для проведения виртуальной сушки фоторезиста после проявления, при этом происходит расчет уравнений диффузии молекул в пленке резиста. Интерес представляет влияние температуры и времени задубливания на степень оплавления фоторезиста и формируемый профиль фоторезиста.

Еще одной интересной возможностью программного пакета является построение кривых, описывающих взаимосвязь нескольких литографических параметров и позволяющих оценить качество процесса фотолитографии. Примером являются кривые Босунга (smile plot), отображающие зависимость размера элемента от дефокусировки при различных значениях дозы экспонирования. Также

в программном пакете доступно получение графиков зависимости размера элемента и угла наклона боковой стенки как функции дефокусировки и дозы экспонирования, построение процессных окон и др.

Говоря об ограничениях модуля Optolith, стоит отметить невозможность физического моделирования операций нанесения и удаления фоторезиста, проведение которых возможно только геометрическим способом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен краткий обзор инструментов для моделирования процесса фотолитографии, выделены наиболее интересные программные средства. Изучены особенности создания моделей фотолитографии в программном пакете от компании Silvaco. Представленные в работе примеры моделирования различных этапов фотолитографии позволяют в доступной форме продемонстрировать возможности модуля Optolith, показать алгоритм процесса создания моделей, а также предложить направления для моделирования. Работа может быть полезна технологам, применяющим фотолитографию на практике. В частности, модели могут быть использованы для повышения разрешающей способности проекционной литографии, а также борьбы с негативными оптическими эффектами, возникающими в резистивных пленках при экспонировании.

Таким образом, при правильном подходе Silvaco TCAD может стать дополнительным инструментом для оптимизации параметров оптической установки, выбора режимов литографического процесса, а также поиска путей миниатюризации элементов на схеме, приводя к уменьшению временных и денежных ресурсов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Макарчук В. В., Родионов И. А., Цветков Ю. Б.** Методы литографии в нанотехнологии: конспект лекций. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2008. 83 с.: ил.
2. Silvaco official website [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.silvaco.com>, свободный (дата обращения: 14.06.2017).

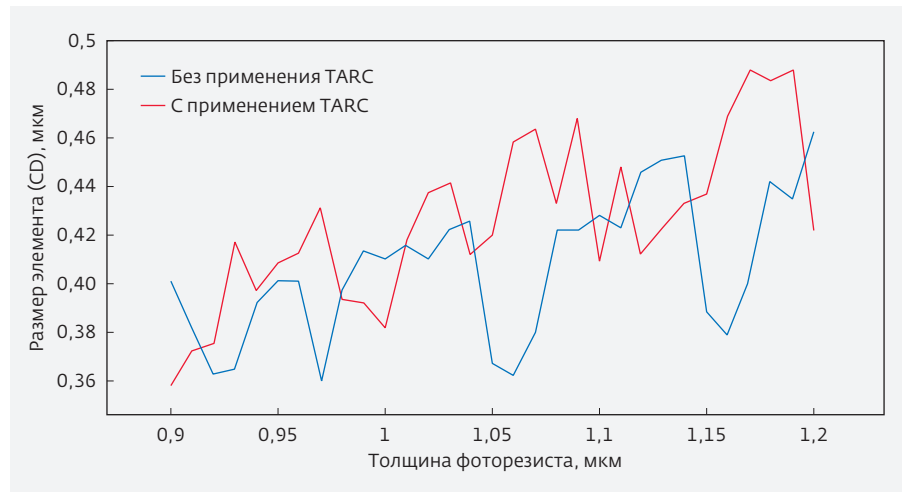


Рис. 4. Колебательные кривые зависимости размера элемента от толщины фоторезиста

3. Synopsys official website [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.synopsys.com>, свободный (дата обращения: 14.06.2017).
4. **Hopkins Н. Н.** Applications of coherence theory in microscopy and interferometry // J. Opt. Soc. Am. 1957. Vol. 4. No 6. P. 508–526.
5. **Домненко В. М.** Математическое моделирование формирования фотолитографического изображения: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.07 / Домненко В. М.; Санкт-Петербургский гос. ин-т точной механики и оптики. – СПб, 1999. 131 с.
6. **Захаревич А. А., Достанко А. П.** Обзор методов повышения разрешающей способности процесса фотолитографии при создании топологии микроструктур субмикронного производства ИМС // Матер. V междунар. науч.-практ. конф. СибАК. – Новосибирск: СибАК 2011. 80–84 с.
7. Optolith – advanced 2D optical lithography simulator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.silvaco.com/content/kbase/optolith.pdf?2014011>, свободный (дата обращения: 15.06.2017).
8. **Dill F. H., Hornberger W. P., Hauge P. S., Shaw J. M.** Characterization of positive photoresist // IEEE Trans. on Electron Devices. 1975. Vol. 22. No 7. P. 445–452.
9. Silvaco, Inc. Athena user's manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dynamic.silvaco.com/dynamicweb/jsp/downloads/DownloadManualsAction.do?req=silvaco-manuals&nm=athena>, свободный (дата обращения: 21.06.2017).

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ИНЖЕКТИРОВАНИЯ ОШИБОК В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ В БАЗИСЕ ПЛИС

► Д. В. Тельпухов, В. С. Рухлов, А. Н. Стасhevский, Ю. Ф. Адамов  
ИППМ РАН

В данной статье предложен эффективный метод вычисления коэффициента чувствительности комбинационной схемы в базисе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Подробно описаны методы оценки сбоеустойчивости комбинационных схем в базисе ПЛИС, и обоснован выбор коэффициента чувствительности схемы к одиночным ошибкам в качестве базовой технологически независимой метрики сбоеустойчивости комбинационных схем в базисе ПЛИС. Непосредственная оценка маскирующих свойств логической схемы по исходному описанию невозможна из-за процесса синтеза и существенного изменения структуры схемы, а оценка характеристик сбоеустойчивости после размещения в кристалл недоступна из-за отсутствия в современных САПР (Altera Quartus II, Xilinx ISE, Synopsys Synplify) необходимых инструментов для получения эквивалента схемы на уровне логических вентилях. Единственной возможностью является создание собственных инструментов анализа нет-листа и построение модели комбинационной схемы для оценки её сбоеустойчивости.

## THE RESEARCH METHOD OF INJECTING ERRORS IN THE PROBLEM OF ASSESSING THE FAILURE TOLERANCE OF THE LOGIC CIRCUITS IN THE BASIS OF FPGA

D.V. Telpukhov, V.S. Rukhlov, A. N. Stashevskii, Yu. F. Adamov  
IPPM RAS

In this article we propose an effective method for the computation of the sensitivity coefficient combinational circuit in the basis of programmable logic integrated circuits (FPGA). Described methods for assessing the failure tolerance of combinational circuits in basis FPGA, and the choice of the coefficient of sensitivity of the method to a single error as a basic technology-independent metric of failure tolerance of combinational circuits in the basis of FPGA.

## ВВЕДЕНИЕ

Важным этапом разработки микроэлектронных устройств, работающих под воздействием радиации и других дестабилизирующих факторов, является оценка сбое- и отказоустойчивости интегральных микросхем. В различных областях человеческой деятельности, где цена ошибки слишком высока, например на атомных станциях и в авиации, применяются различные программные и аппаратные

средства повышения надежности, чаще всего связанные с той или иной реализацией принципов кратного резервирования. Таким образом, уже на этапе разработки необходимо иметь возможность получать оценки различных параметров отказоустойчивости (наработка на отказ и др.) для сравнения эффективности применяемых методов.

Важным этапом при создании надежных схем в базисе ПЛИС является оценка параметров сбое-

устойчивости, включающих маскирующие свойства логической схемы. В настоящее время для оценки сбоеустойчивости схем, реализованных в этом базисе, разработан ряд методов и подходов [1].

Результатом всех представленных методов является параметр интенсивности отказов (Soft Error Rate (SER)), который является интегральным параметром, зависящим как от логической структуры схемы, так и от технологических характеристик элементной базы кристалла. Это не дает возможности применить подход ресинтеза комбинационных схем для повышения маскирующих свойств исходной схемы.

В настоящее время повышение сбоеустойчивости интегральных схем обеспечивается добавлением избыточности на уровне элементной базы, временной избыточностью, а также применением различных методик самопроверок [2]. Несмотря на достигнутые успехи в разработке кодовых методов защиты, используемых при хранении, передаче, а также арифметической обработке данных [3, 4], для обеспечения требуемого уровня сбоеустойчивости арифметических и логических схем до сих пор используют методы кратного резервирования [5, 6].

В настоящее время одним из динамично развивающихся направлений цифровой схемотехники являются программируемые логические интегральные схемы – ПЛИС. Одним из широко используемых сегодня типов ПЛИС являются ПЛИС FPGA (англ. field-programmable gate array) – программируемые пользователем вентильные матрицы, которые имеют много логических элементов – конфигурируемых пользователем логических блоков – и гибкую архитектуру. В настоящее время ПЛИС активно применяются в аппаратуре специального назначения, такой как изделия, применяемые в области авионики, космонавтики, управления ответственными промышленными объектами, например атомными электростанциями. В таких устройствах очень большое внимание уделяется надежности элементной базы. В том числе остро стоит проблема повышения сбоеустойчивости программируемых интегральных схем.

Существующие методы повышения сбоеустойчивости для комбинационных схем чаще связаны с методами кратного резервирования, однако добавление избыточности повышающей сбоеустойчивость для таких схем требует учёта используемой архитектуры ПЛИС, так как иначе велика вероятность отсутствия повышения сбоеустойчивости или обратного эффекта от добавления подобной избыточности.

## МАРШРУТ ПОСТРОЕНИЯ СБОЕУСТОЙЧИВОЙ КОМБИНАЦИОННОЙ СХЕМЫ В БАЗИСЕ ПЛИС

Повышение сбоеустойчивости в данном случае обязано учитывать особенности архитектуры, используемой в проекте ПЛИС. Используемые методы отличаются для разных схем, однако можно построить общий маршрут проектирования для всех схем ПЛИС [1], показанный на рис. 1.

Важным этапом маршрута проектирования сбоеустойчивых комбинационных схем в базисе ПЛИС является этап оценки сбоеустойчивости.

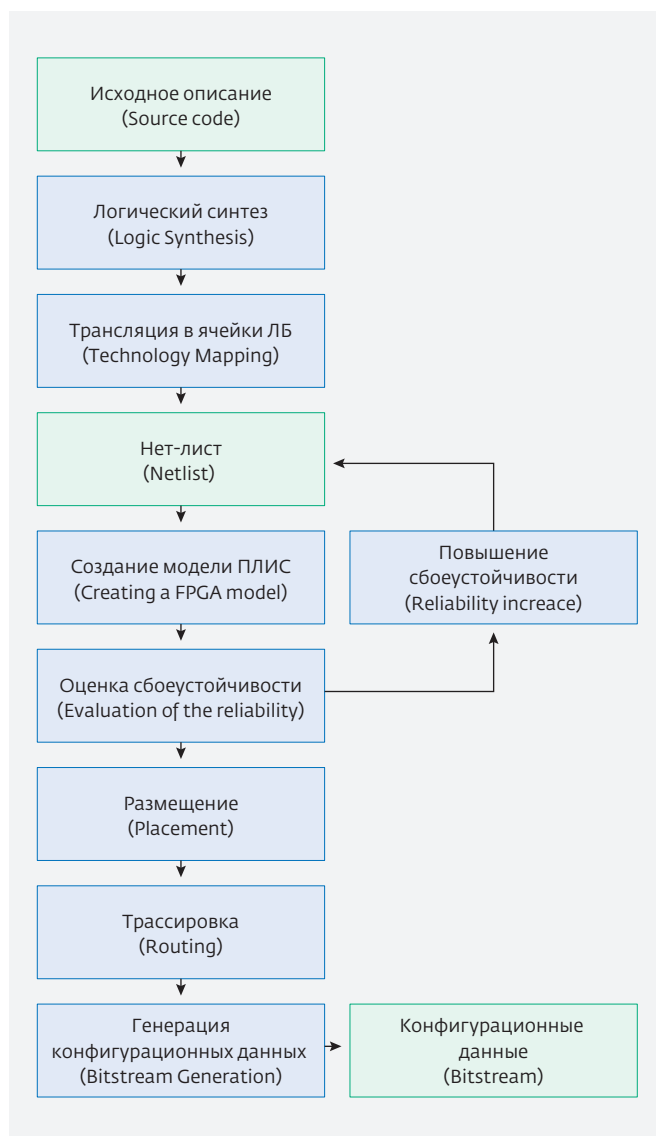


Рис. 1. Маршрут проектирования сбоеустойчивых схем ПЛИС на основе незащищенной элементной базы.

## ОПИСАНИЕ ЭТАПА ОЦЕНКИ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ

Оценка сбоеустойчивости комбинационной схемы в базисе ПЛИС демонстрирует возможности проекта маскировать возможные сбои. Для оценки сбоеустойчивости достаточно поочередно вносить неисправности (одиночная обратимая инверсия текущего значения) в каждый вентиль проекта, моделируя при этом входные данные. Метрика сбоеустойчивости определяет вероятность возникновения комбинации входных данных и единичной ошибки на мультиплексоре, приводящих к возникновению ошибки на выходе схемы в базисе ПЛИС [7].

Для адаптации оценки сбоеустойчивости комбинационной схемы в базис ПЛИС необходимо учитывать не только исходное описание, но и структуру применяемой ПЛИС. Несмотря на всё многообразие существующих ПЛИС, типовая структура является достаточно однородной и состоит из ячеек ЛБ (Логических блоков, LUT - Look up table). Структура ячейки ЛБ представлена на рис. 2.

Проект в базисе ПЛИС формируется за счет изменения межсоединений ячеек ЛБ и конфигурационных данных этих ячеек. Таким образом, общая структура комбинационной части проекта в базисе ПЛИС равнозначно представлена не только описанием на уровне мультиплексоров, но и на уровне ячеек ЛБ, а также и конфигурационных бит.

Для оценки сбоеустойчивости требуется воссоздать эквивалентную модель схемы, реализованную в базисе логических вентилях и вносить сбои в комбинационную часть ПЛИС, а значит и лежащие в её основе мультиплексоры, либо аналогичным образом при внесении сбоев в ячейку ЛБ, либо, меняя один из конфигурационных бит, которые, аналогичным образом формируют комбинационную схему, а значит внесение одиночного обрати-

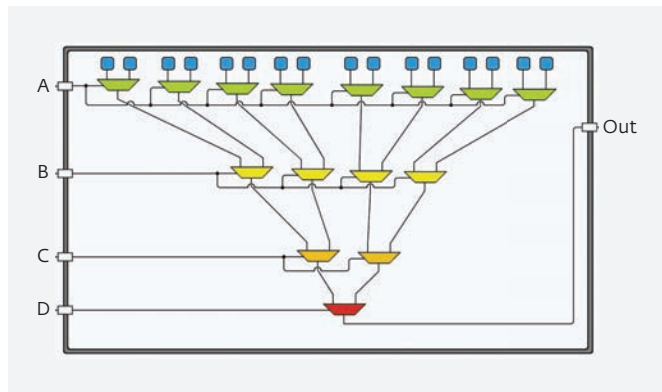


Рис. 2. Модель ячейки ЛБ

мого сбоя в них, равносильно изменению данных на мультиплексорах.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ОЦЕНКИ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ

В данной работе под сбоеустойчивостью схемы понимается степень её уязвимости к кратковременным ошибкам, которые возникают из-за одиночных обратимых сбоев (single event transient), источниками которых чаще всего служат попадания ионизирующих частиц.

Целью методов оценки сбоеустойчивости является получение полинома ошибки  $F(p)$  [7], который определяет вероятность возникновения такой комбинации входных сигналов и вектора ошибки, которая приводит к некорректной работе схемы. Аргументом этого полинома является параметр  $p$ , обозначающий вероятность ошибки в одном мультиплексоре схемы, трактуемый как комбинация различных дестабилизирующих эффектов и источников помех, включая наземное космическое излучение, а также перекрестные и электромагнитные помехи. Следуя модели независимых вентиляльных сбоев в трактовке Фон Неймана [8] будем считать, что все мультиплексоры имеют одинаковую независимую вероятность сбоя, в то время как количество ошибок в схеме не ограничено. Под ошибкой понимается инверсия сигнала на выходе вентиля. Таким образом, полином ошибки является характеристикой, отражающей способность схемы противостоять случайным сбоям её элементов.

Введем некоторые обозначения. Пусть  $\Omega$  будет обозначать набор всех вентилях в схеме, в то время как  $N$  и  $M$  это число входов и число ячеек ЛБ соответственно. В каждой четырехвходовой ячейке ЛБ содержится 15 мультиплексоров и 16 бит конфигурационной памяти, что соответствует количеству  $15M$  и  $16M$  мультиплексоров и конфигурационных бит во всей ПЛИС. Будем обозначать ошибки, возникающие на выходах ячеек ЛБ как  $e_{iout}$ , выходах мультиплексоров как  $e_{imux}$ , конфигурационных битах как  $e_{imem}$ , причем  $e_{imux} = 1$ , если на  $i$ -ом мультиплексоре возникла ошибка. В случае отсутствия ошибки  $e_{imux} = 0$ . Вектор  $\vec{e}_{tmux} = (e_{1tmux}, e_{2tmux}, \dots, e_{Mtmux})$  будем называть вектором ошибки по аналогии с вектором входных значений  $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ .

Получим основные формулы для нахождения при внесении сбоев в мультиплексоры.

$E_{tmux}(\vec{X}, \vec{e}_{tmux})$  обозначает характеристическую функцию набора пар векторов (входных сигналов  $\vec{X}$  и векторов ошибок  $\vec{e}_{tmux}$ ):



$$E_{mix}(\bar{X}, \bar{e}_{mix}) = \begin{cases} 1, & \text{если набор } (\bar{X}, \bar{e}_{mix}) \\ & \text{приводит к ошибке.} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

### ВЫВОД ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОЛИНОМА ОШИБКИ В ОБЩЕМ ВИДЕ ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ В БАЗИСЕ ПЛИС

Учитывая, что вероятность появления на входе конкретного вектора входных сигналов  $\bar{X}$  длины  $N$  (в предположении равномерности всех таких наборов) равна  $\frac{1}{2^N}$ , а вероятность возникновения

вектора ошибки длины  $15M$  и веса  $|\bar{e}_{mix}|$  равна  $p^{|\bar{e}_{mix}|}(1-p)^{15M-|\bar{e}_{mix}|}$ , получаем вероятность ошибки на выходе схемы (вес вектора равен количеству его ненулевых элементов):

$$F(p) = \frac{1}{2^N} \sum_{\bar{X}, \bar{e}_{mix}} E_{mix}(\bar{X}, \bar{e}_{mix}) p^{|\bar{e}_{mix}|} (1-p)^{15M-|\bar{e}_{mix}|}. \quad (2)$$

### КОЭФФИЦИЕНТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ОДИНОЧНЫМ СБОЯМ

Из формулы (2) видно, что вычислительная сложность точного аналитического вычисления полинома ошибки экспоненциально зависит от числа входов и числа мультиплексоров, что делает этот метод неприменимым даже для сравнительно небольших схем. В связи с этим в настоящее время все методы оценки маскирующих свойств комбинационной логики балансируют между высокой вычислительной сложностью и точностью результатов характеристик сбоеустойчивости [9].

Прежде всего, нужно определить понятие наблюдаемости мультиплексора в контексте задачи оценки сбоеустойчивости комбинационных схем. В этом контексте наблюдаемость мультиплексора  $i$  рассматривается как вероятность того, что ошибка на этом мультиплексоре не будет маскирована и повлияет на выход логической схемы, при условии, что на остальных мультиплексорах ошибки не возникло. Можно трактовать наблю-

даемость как меру уязвимости мультиплексора в схеме.

Обозначая наблюдаемость как  $o_{mix}$ , получим:

$$o_{mix} = \frac{1}{2^N} \sum_{\bar{X}} E_{mix}(\bar{X}, \bar{e}_{mix}_k), \quad (3)$$

где  $\bar{e}_{mix}_k$  имеет только одну единицу на позиции  $e_{mix}_k$ , в то время как остальные  $e_{jmix} = 0$ .

Одним из очевидных предположений является предположение о низкой вероятности возникновения ошибки  $p$ . Действительно, интенсивность сбоев в современных КМОП-схемах лежит в пределах  $10^{-8} - 10^{-4}$  [10]. В данной работе для оценки сбоеустойчивости логических схем предлагается использовать некоторый обобщенный коэффициент логической уязвимости ПЛИС [11]:

$$\alpha_{mix} = \frac{1}{2^N} \sum_{\bar{X}, \bar{e}_{mix}, |\bar{e}_{mix}|=1} E_{mix}(\bar{X}, \bar{e}_{mix}). \quad (4)$$

А также его аналогичные вариации, отличающиеся в кратном масштабе для ячеек ЛБ и конфигурационных бит памяти соответственно:

$$\alpha_{lut} = \frac{1}{2^N} \sum_{\bar{X}, \bar{e}_{lut}, |\bar{e}_{lut}|=1} E_{lut}(\bar{X}, \bar{e}_{lut}), \quad (5)$$

$$\alpha_{mem} = \frac{1}{2^N} \sum_{\bar{X}, \bar{e}_{mem}, |\bar{e}_{mem}|=1} E_{mem}(\bar{X}, \bar{e}_{mem}). \quad (6)$$

Время выполнения оценки сбоеустойчивости методом внесения неисправностей в мультиплексоры, конфигурационную память или в ячейки ЛБ

Схема / метод	Время, мс		
	мультиплексор	память	ячейка ЛБ
c1355.v	148 114,48	12 674	803
c17.v	121,2	20	10
c1908.v	363 058,64	29 536	1 919
c2670.v	1 115 500,56	107 603	6 942
c3540.v	4 047 595,2	299 368	19 937
c432.v	187 043,92	15 818	1 045
c499.v	144 131,04	12 730	842
c5315.v	6 304 169,52	477 657	32 495
c6288.v	7 899 258,48	568 793	37 970
c7552.v	6 016 626,56	483 088	31 915

Суммирование ведется по всем входным комбинациям и всем комбинациям векторов ошибок, вес которых равен единице.

При малых значениях  $p$  в полиноме  $F(p)$  вклад членов со степенью выше первой оказывается незначительным, что означает доминирование однократных ошибок. Этот факт позволяет считать только те вектора ошибок, вес которых равен единице. Аналитически формулы (4), (5) и (6) представляют собой линейные коэффициенты функции вероятности ошибки на выходе схемы. Графически эти параметры представляют собой касательные к графику  $F(p)$ .

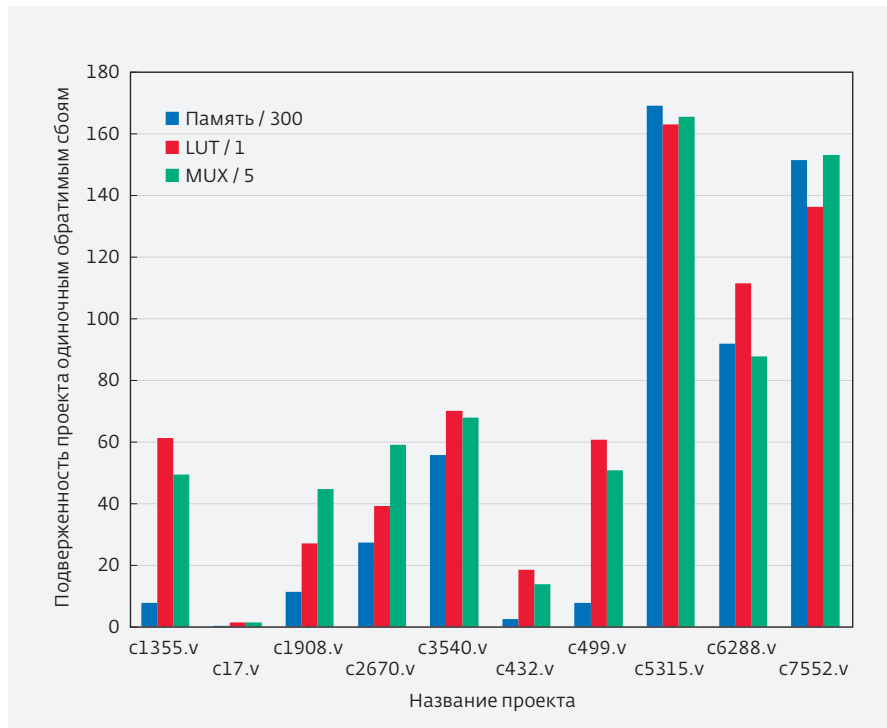
Анализируя формулы (3) и (4) можно сделать вывод, что обобщенный коэффициент логической устойчивости схемы представляет собой сумму наблюдаемостей вентилях  $\alpha_{mux} = \sum_{i \in \text{mux} \in \Omega} o_{i \text{mux}}$

и характеризует среднее число ненадежных мультиплексоров в схеме, то есть тех элементов, ошибка в которых приводит к ошибке на выходе схемы.

Предлагаемая метрика сбоеустойчивости обладает рядом преимуществ. Во-первых, вычислительная сложность метода линейная относительно количества элементов, что вкупе с методами бит-параллельного моделирования и методами Монте-Карло позволяет использовать эту метрику для сравнительно больших схем. Во-вторых, для большинства практических применений, в условиях, когда вероятность сбоя вентиля стремится к нулю – эта аппроксимация является наиболее точной, являясь касательной к графику полинома ошибки в точке ноль.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ОЦЕНКИ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ

Были проведены вычислительные эксперименты, целью которых являлось определение вычислительных затрат на оценку коэффициента чувствительности схемы для различных бенчмарк-схем с помощью метода внесения неисправностей в ячейки ЛБ, либо мультиплексоры, либо конфи-



**Рис. 3.** Отмасштабированная оценка сбоеустойчивости методом внесения неисправностей в мультиплексоры (для наглядности значения уменьшены в пять раз, графа на рисунке обозначена, как «MUX/5»), конфигурационную память (значения уменьшены в 300 раз, графа на рисунке обозначена, как «память/300») или в ячейки ЛБ (графа на рисунке обозначена, как «LUT/1»)

гурационные биты ПЛИС. Для проведения исследований было разработано программное обеспечение на языке Python 3.6, реализующее оба метода оценки, а также различные вспомогательные функции, включая функции генерации произвольных схем с заданным числом элементов и первичных входов. Оценка вычислительной сложности методов производилась на машине с четырехядерным процессором Intel Core i5-3470@3.2GHz с оперативной памятью 8 Гбайт DDR3-1600.

Метрика внесения сбоев в ячейки ЛБ, мультиплексоры и биты памяти демонстрирует близкие результаты для широкого набора схем. Экспериментальные данные показывают, что с уменьшением размеров схемы результаты различных метрик начинают значительно различаться.

Время, затраченное на выполнение расчета метрик, при внесении сбоев в конфигурационные биты памяти в среднем в 11,6 раза меньше, чем при внесении сбоев в мультиплексоры, а также в 169 раз меньше при внесении сбоев в ячейки ЛБ, чем при внесении сбоев в мультиплексоры.

На основе экспериментальных данных очевидно, что наиболее эффективной метрикой сбоеустойчивости является метод внесения сбоев в ячейки ЛБ, который не только показывает близкие результаты к более точному методу внесения сбоев в мультиплексоры, но и значительно превосходит другие методы оценки сбоеустойчивости по скорости выполнения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложен эффективный метод вычисления коэффициента чувствительности комбинационной схемы в базисе ПЛИС. Подробно описаны методы оценки сбоеустойчивости комбинационных схем в базисе ПЛИС, и обоснован выбор коэффициента чувствительности схемы к одиночным ошибкам в качестве базовой технологически независимой метрики сбоеустойчивости комбинационных схем в базисе ПЛИС. Исследования вычислительной сложности техник внесения ошибок продемонстрировали существенные различия вычислительной сложности разных подходов, что позволило обосновать выбор метода оценки путем внесения сбоев в ячейки ЛБ, для использования при вычислении коэффициента чувствительности. Проведены вычислительные эксперименты, демонстрирующие существенное ускорение вычислений предлагаемой метрики при незначительных потерях в точности оценки.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Тельпухов Д.В., Рухлов В.С., Рухлов И.С.** Исследование и разработка методов оценки сбоеустойчивости комбинационных схем, реализованных в базисе ПЛИС // Инженерный вестник дона, 2016.
2. **Гаврилов С.В., Иванова Г.А., Рыжова Д.И., Соловьев А.Н., Стемпковский А.Л.** Методы синтеза помехозащищенных комбинационных блоков. Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 11. С. 821-826.
3. **Морелос-Сарагоса Р.** Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2006, 320 с.
4. **Амербаев В. М., Корнилов А.И., Стемпковский А.Л.** Модулярная логарифметика – новые возможности для проектирования модулярных вычислителей и преобразователей // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010»: сб. научн. тр. – М.: ИППМ РАН, 2010.
5. **El-Maleha A. H., Oughalia F.C.** A generalized modular redundancy scheme for enhancing fault tolerance of combinational circuits / *Microelectronics Reliability*, vol. 54, № 1, 2014, 316-326 pp.
6. **Стемпковский А.Л., Тельпухов Д.В., Соловьев Р.А., Мячиков М.В.** Повышение отказоустойчивости логических схем с использованием нестандартных мажоритарных элементов // Журнал «Информационные технологии», № 10, том 21, С. 749-756, 2015 г.
7. **Стемпковский А.Л., Тельпухов Д.В., Соловьев Р.А., Соловьев А.Н., Мячиков М.В.** «Моделирование возникновения неисправностей для оценки надежностных характеристик логических схем» // Информационные технологии. 2014. № 11. С. 30-36.
8. **J. von Neumann.** «Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components,» in *Automata Studies*, C. E. Shannon and J. McCarthy, Eds. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1956, pp. 43-98.
9. **R. Xiao, C. Chen.** «Gate-level circuit reliability analysis: A survey,» *VLSI Design*, Vol. 2014, Article ID529392, pp. 1-12, 2014.
10. **Choudhury MR, Mohanram K.** Reliability analysis of logic circuits. *IEEE Trans CAD*2009;28(3):392-405.
11. **Стемпковский А.Л., Тельпухов Д.В., Соловьев Р.А., Мячиков М.В., Тельпухова Н.В.** Разработка технологически-независимых метрик для оценки маскирующих свойств логических схем // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 2.

### МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ: ИНТЕГРАЦИЯ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ ПРОМЫШЛЕННЫМИ СРЕДСТВАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

В рамках данной работы был разработан маршрут автоматизированного проектирования для программируемых логических интегральных схем с архитектурой семейства 5510XC производства ПАО «Микрон». Для решения задач автоматизации проектирования с учетом курса на импортозамещение программных продуктов разработаны собственные программные средства, учитывающие специфику архитектуры ПЛИС семейства 5510XC. Программные средства собственной разработки обеспечивают проектирование на таких этапах маршрута, как технологическое отображение, кластеризация, размещение логических элементов и трассировка межсоединений. Кроме этого, разработанный и апробированный в ИППМ РАН совместно с АО «НИИМЭ» маршрут автоматизированного проектирования обеспечивает интеграцию с различными существующими промышленными средствами САПР: как коммерческими, так и свободно распространяемыми.

**Ключевые слова:** маршрут проектирования; автоматизация проектирования; программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС); система автоматизированного проектирования (САПР); импортозамещение

#### Сведения об авторах:

Гаврилов Сергей Витальевич, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом САПР, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем проектирования в микроэлектронике" Российской академии наук, 124617, г. Москва, г. Зеленоград, корп. 1471, кв. 325, e-mail: sergey\_g@ippm.ru

Железников Даниил Александрович, аспирант кафедры проектирования интегральных микросхем МИЭТ, младший научный сотрудник отдела САПР, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем проектирования в микроэлектронике" Российской академии наук, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, корп. 200А, кв. 126, e-mail: zheleznikov\_d@ippm.ru

Тиунов Иван Викторович, аспирант кафедры проектирования интегральных микросхем МИЭТ, инженер-проектировщик 2 категории отдела САПР, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем проектирования в микроэлектронике" Российской академии наук, 124683, г. Москва, г. Зеленоград, корп. 1505, кв. 76, e-mail: tiunov\_i@ippm.ru

Липатов Иван Алексеевич, аспирант кафедры проектирования интегральных микросхем МИЭТ, инженер-исследователь отдела САПР, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем проектирования в микроэлектронике" Российской академии наук, 124482, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Юности, д. 13, к. 135, e-mail: lipatov\_i@ippm.ru

### КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ТРАНЗИСТОРОВ, ОРИЕНТИРОВАННЫХ НА ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ

В данной статье рассматриваются различные варианты конструкции LDMOS-транзисторов, ориентированных на высокое напряжение питания. Рассмотренные конструкции позволяют добиться более высокого напряжения пробоя и более низкого сопротивления в открытом состоянии по сравнению со стандартной конструкцией LDMOS-транзистора.

**Ключевые слова:** высоковольтный транзистор, пробойное напряжение, ступенчатый затвор, кремний на изоляторе, профиль легирования

#### Сведения об авторах:

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

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

Игнатов Павел Викторович, главный конструктор элементной базы, Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1, e-mail: paignatov@mikron.ru

Мизгинов Дмитрий Сергеевич, Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: dmizginov@mikron.ru

### DESIGN FLOW FOR DOMESTIC PROGRAMMABLE INTEGRATED CIRCUITS FOR SPECIAL PURPOSE: INTEGRATION WITH EXISTING COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS AND SOLUTION FOR PROBLEMS OF IMPORT SUBSTITUTION

In this paper, we developed the automated design flow for programmable logic integrated circuits with family architecture of 5510XC manufactured by PJSC «Mikron». For solving the problems of design automation taking into account the course for import substitution we have developed our own software that consider the specific architecture of the FPGA family 5510XC. This software is used at following stages of the design flow: technology mapping, clustering, logic elements placement and interconnect routing. The proposed design flow was developed and tested in the IPPM RAS in cooperation with JSC «NIIME» and provides integration with various existing industrial CAD systems: both commercial and open source distributed.

**Keywords:** design flow; computer-aided design; Field-Programmable Gate Array (FPGA); automated design system; import substitution

#### Data of authors:

Gavrilov Sergey Vitalevich, doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the CAD Department at the Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, 1471–325, Zelenograd, Moscow, 124617, e-mail: sergey\_g@ippm.ru

Zheleznikov Daniil Aleksandrovich, post graduate student of the Integrated Circuits Design Department of MIET, Junior Researcher of the CAD Department at the Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, 200A–126, Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: zheleznikov\_d@ippm.ru

Tiunov Ivan Viktorovich, post graduate student of the Integrated Circuits Design Department of MIET, second category design engineer of the CAD Department at the Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, 1505–76, Zelenograd, Moscow, 124683, e-mail: tiunov\_i@ippm.ru

Lipatov Ivan Alekseevich, post graduate student of the Integrated Circuits Design Department of MIET, research engineer of the CAD Department at the Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, 13–135, Unosti street, Zelenograd, Moscow, 124482, e-mail: lipatov\_i@ippm.ru

### CONSTRUCTIVE-TECHNOLOGICAL METHODS FOR IMPLEMENTING TRANSISTORS AIMED AT HIGH SUPPLY VOLTAGE

In this article various designs of LDMOS transistors aimed at high supply voltage are considered. Designs considered allow to achieve higher breakdown voltage and lower on-resistance compared to a standard design of an LDMOS transistor.

**Keywords:** high-voltage transistor, breakdown voltage, stepped gate, silicon on insulator, doping profile

#### Data of authors:

Krasnikov Gennadiy Yakovlevich, doctor of technical Sciences, Russian Academy of Sciences academician, Molecular Electronics Research Institute, Stock Company, 12/1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: gkrasnikov@mikron.ru

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

Ignatov Pavel Viktorovich, VLSI element base Chief designer, Molecular Electronics Research Institute, Stock Company, 12/1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: paignatov@mikron.ru

Mizginov Dmitriy Sergeevich, Molecular Electronics Research Institute, Stock Company, 12/1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: dmizginov@mikron.ru

## ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ТЕХНОЛОГИИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА: ЧАСТЬ 2. ВОПРОСЫ МЕТОДА И КЛАССИФИКАЦИИ

Обсуждаются методологические и философские положения, лежащие в основе авторского варианта общей теории технологии. Раскрывается специфика технологии в приложении к техническим, биологическим и социальным системам и доказывается возможность их абстрактно-технологического описания. Введено понятие пантехнологии. Сформулирован ряд классификационных критериев для технологий.

**Ключевые слова:** технология, процесс, философия, философия техники, живые системы, общество, концептуальные методы, теория родов структур Бурбаки

### Сведения об авторах:

Красников Геннадий Яковлевич, д.т.н., академик РАН, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.12/1, e-mail: gkrasnikov@mikron.ru

Горнев Евгений Сергеевич, д.т.н., профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1, e-mail: egornev@mikron.ru

Матюшкин Игорь Валерьевич, к.ф.-м.н. Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1, e-mail: imatushkin@mikron.ru

## МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ СЛОЕВ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Разработана молекулярно-кинетическая модель процесса осаждения слоев из газовой фазы, включающая комплексную схему и выражения для расчета скоростей стадий гетерогенного и гомогенного роста. Модель учитывает диффузию, адсорбцию и химическое превращение реагентов с образованием на подложке и в пограничном газовом слое основного, побочного продуктов и кластеров. Сформулированы показатели химической, структурной и топологической неоднородностей как базовых, определяющих отклонения технологических и эксплуатационных характеристик слоев. Даны выражения для количественной оценки и прогнозирования неоднородностей слоев для различных условий роста. Апробация модели на примере осаждения оксида кремния показала удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** осаждение слоев, моделирование процесса, гетерогенный и гомогенный рост, побочные продукты, кластеры

### Сведения об авторах:

Евдокимов Владимир Лукьянович, Публичное акционерное общество «Микрон», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-ый Западный проезд, д. 12/1, e-mail: vevdokimov@mikron.ru

## SILVACO TCAD КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Представлен краткий обзор программного обеспечения для моделирования фотолитографии. Описаны теоретические основы и особенности создания моделей данного технологического процесса в программном пакете Silvaco TCAD. Рассмотрены основные возможности модуля Optolith. Приведены результаты компьютерного моделирования различных этапов литографического процесса, рассмотрены факторы, влияющие на формирование изображения. Особое внимание уделено исследованию оптических явлений, сопровождающих процесс фотолитографии.

**Ключевые слова:** Silvaco TCAD, приборно-технологическое моделирование, фотолитография, фоторезист

### Сведения об авторах:

Лысенко Ирина Александровна, аспирант кафедры БИС Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: caladenia92@gmail.com

Зыков Дмитрий Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры КИБЭВС Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: dmitry.zykov@tusur.ru

Анищенко Екатерина Валентиновна, заместитель начальника производственного отдела СВЧ МИС НПК «Микроэлектроника» Акционерного общества научно-производственной фирмы «Микран», 634041, г. Томск, пр-т Кирова, 51д, e-mail: aev@micran.ru

Хабибуллина Надежда Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры КСУП Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: hnu@kcup.tusur.ru

## GENERAL THEORY OF TECHNOLOGY AND MICROELECTRONICS: PART 2. ISSUES OF METHODOLOGY AND CLASSIFICATION

The methodological and philosophical foundations underlying the author's version of the General Technology Theory are discussed. The specificity of technologies in the application to technical, biological and social systems is revealed and the possibility of their abstract technological description is proved. The concept "panotechnology" is introduced. Some classification criteria for technology are formulated.

**Keywords:** technology, process, philosophy, philosophy of technology, living systems, society, conceptual design methods, Bourbaki's theory of structures

### Data of authors:

Krasnikov Gennady Yakovlevich, Doctor of Engineering Sciences, Russian Academy of Sciences academician; Molecular Electronic Research Institute; Stock Company, 12/1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russian Federation, 124460, e-mail: gkrasnikov@niime.ru

Gornev Evgeni Sergeevich, Doctor of Engineering Sciences, Molecular Electronic Research Institute; Stock Company, 12/1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russian Federation, 124460, e-mail: egornev@niime.ru

Matushkin Igor Valerevich, Dr.Ph, Molecular Electronic Research Institute; Stock Company, 12/1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russian Federation, 124460, e-mail: imatushkin@niime.ru

## MODELING OF KINETICS OF CHEMICAL VAPOR DEPOSITION AND THE BASIC CHARACTERISTICS OF THE LAYERS

Developed the molecular-kinetic model of formation of layers from the gas phase, including complex kinetic scheme and equations for calculations of the speeds of heterogeneous and homogeneous growth. The growth rate takes into account the stage of diffusion, adsorption and chemical reaction with the formation on the substrate and in a boundary layer of the main gas, by-products and clusters. Defined indicators of chemical, structural and topological inhomogeneities, as the base, define technological and operating characteristics of the layers. This expression for quantifying the baseline. Testing models for analysis of deposition process of silicon oxide showed satisfactory agreement between calculated and experimental data.

**Keywords:** deposition of layers, process Modelling, heterogenous and homogenous deposition, by-products, clusters

### Data of authors:

Evdokimov Vladimir Lukjanovich, Mikron, JSC, 124460, Russian Federation, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: vevdokimov@mikron.ru

## SILVACO TCAD AS A TOOL FOR PHOTOLITHOGRAPHY SIMULATION

A brief overview of photolithography simulation software is presented. The theoretical foundations and peculiarities of the technological process simulation in Silvaco TCAD are described. The main features of Optolith module are considered. The computer simulation results of lithographic process various stages are presented, the factors affecting the formation of image are considered. Special attention is paid to the study of optical phenomena accompanying the photolithography.

**Keywords:** Silvaco TCAD, technology computer aided design, photolithography, photoresist

### Data of authors:

Lysenko Irina Aleksandrovna, PhD student, DEP. BIS Tomsk state University of control systems and Radioelectronics, 40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, e-mail: ca-ladenia92@gmail.com

Zykov Dmitrii Dmitrievich, candidate of technical Sciences, associate Professor, Tomsk state University of control systems and radio electronics, 40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, e-mail: dmitry.zykov@tusur.ru

Anishchenko Ekaterina Valentinovna, Deputy head of production Department of microwave MIS NPK "Microelectronics", Joint stock company research and production company "Micran", 51 d, Kirova Ave., Tomsk, Russia, 634041, e-mail: aev@micran.ru

Habibulina Nadezhda Yurievna, candidate of technical Sciences, associate Professor of CSEA Tomsk state University of control systems and Radioelectronics, 40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, e-mail: hnu@kcup.tusur.ru

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ИНЖЕКТИРОВАНИЯ ОШИБОК В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ В БАЗИСЕ ПЛИС

В данной статье предложен эффективный метод вычисления коэффициента чувствительности комбинационной схемы в базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Подробно описаны методы оценки сбоеустойчивости комбинационных схем в базе ПЛИС, и обоснован выбор коэффициента чувствительности схемы к одиночным ошибкам в качестве базовой технологически независимой метрики сбоеустойчивости комбинационных схем в базе ПЛИС.

**Ключевые слова:** оценка сбоеустойчивости, ресинтез, комбинационная схема, ПЛИС, инжектирование ошибок

#### Сведения об авторах:

Тельпухов Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, руководитель отдела Методологии проектирования интегральных схем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем проектирования в микроэлектронике" Российской академии наук, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3, e-mail: nofrost@inbox.ru

Рухлов Владимир Сергеевич, младший научный сотрудник отдела Методологии проектирования интегральных схем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем проектирования в микроэлектронике" Российской академии наук, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3, e-mail: vladimir.rukhlov@ippm.ru

Сташевский Александр Николаевич, стажер-исследователь отдела Методологии проектирования интегральных схем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем проектирования в микроэлектронике" Российской академии наук, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3, e-mail: melodyman25@mail.ru

Адамов Юрий Фёдорович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела Методологии проектирования интегральных схем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем проектирования в микроэлектронике" Российской академии наук, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3, e-mail: adamov@ippm.ru

### THE RESEARCH METHOD OF INJECTING ERRORS IN THE PROBLEM OF ASSESSING THE FAILURE TOLERANCE OF THE LOGIC CIRCUITS IN THE BASIS OF FPGA

In this article we propose an effective method for the computation of the sensitivity coefficient combinational circuit in the basis of programmable logic integrated circuits (FPGA). Described methods for assessing the failure tolerance of combinational circuits in basis FPGA, and the choice of the coefficient of sensitivity of the method to a single error as a basic technology-independent metric of failure tolerance of combinational circuits in the basis of FPGA.

**Keywords:** Evaluation of fault tolerance, resynthesis, combinational circuit, FPGA, error injection

Tel'pukhov Dmitriy Vladimirovich, Candidate of Technical Science, Head of the department of integrated circuits design methodology, Zelenograd, Russia, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, Sovetskaya st., 3, Zelenograd, Russia, 124365, e-mail: nofrost@inbox.ru

Rukhlov Vladimir Sergeevich, Junior researcher, Zelenograd, Russia, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, Sovetskaya st., 3, Zelenograd, Russia, 124365, e-mail: vladimir.rukhlov@ippm.ru

Stashevskii Aleksander Nikolaevich, Trainee, Zelenograd, Russia, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, Sovetskaya st., 3, Zelenograd, Russia, 124365, e-mail: melodyman25@mail.ru

Adamov Yuri Fedorovich, Doctor of Technical Science, Leading researcher, Zelenograd, Russia, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, Sovetskaya st., 3, Zelenograd, Russia, 124365, e-mail: adamov@ippm.ru

## ОБЪЯВЛЯЕТСЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

### «ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. СЕРИЯ 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА» НА 2018 ГОД!

На страницах журнала публикуются научно-исследовательские статьи в области исследования и разработки новых материалов, изделий, технологий и оборудования микро- и нанoeлектроники, а также новые теоретические исследования, имеющие отношение к микро- и нанoeлектронике. Журнал издается с 2014 года. На данный момент в журнале опубликовано более 120 статей, подготовленных высококвалифицированными российскими и зарубежными учеными и специалистами. Публикации цитируются ведущими институтами Российской академии наук и высшими учебными заведениями, такими как ИФП СО РАН, ИПТМ РАН, ФТИАН, МГУ им. М. В. Ломоносова, МФТИ, МИФИ, МИРЭА и многими другими. В перспективе журнал планирует увеличить число региональных авторов, расширяя прямые контакты с региональными учебными заведениями и научными институтами.

Журнал «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника» вошел в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, включённых Высшей аттестационной комиссией (ВАК) России в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание учё-

ной степени кандидата и доктора наук, что является гарантом качества публикуемых научных статей, их актуальности и новизны.

**Оформить подписку** на печатные версии журналов можно через Почту России и альтернативные агентства: **подписной индекс 80408 в каталоге ОАО Агентство «Роспечать».**

**Приобрести отдельные выпуски журналов и статей в электронном виде** можно путем покупки прав пользования электронной версией журнала или статьей на сайте <http://elibrary.ru/defaultx.asp>.

**Оформить подписку или приобрести отдельные выпуски** можно непосредственно в редакции:

**для юридических лиц:** по гарантийному письму за подписью руководителя и главного бухгалтера с указанием реквизитов предприятия (скан письма можно направить на электронный адрес: [journal\\_EEM-3@mikron.ru](mailto:journal_EEM-3@mikron.ru), а оригинал по почте: 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, дом 12, строение 1),

**для физических лиц:** оплатив квитанцию в любом отделении "Сбербанка России".

<b>Извещение</b>	<p>Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (наименование получателя платежа)</p> <p>7735579027/773501001 40702810100410001663 (ИНН / КПП получателя платежа) (номер счета получателя платежа)</p> <p>в Филиал «Центральный» Банка ВТБ в г. Москве БИК 044525411 (наименование банка получателя платежа)</p> <p>30101810145250000411 в Филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО), г. Москва (Номер кор./сч. банка получателя платежа)</p> <p>_____ (наименование платежа)</p> <p>Ф.И.О. плательщика _____ Адрес плательщика _____ Сумма платежа _____ руб. _00 коп. Сумма платы за услуги _____ руб. ___ коп. Итого _____ руб. __ коп. « ____ » _____ 20 ____ г. С условиями приема указанной в платёжном документе суммы, в т. ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. <b>Подпись плательщика</b> _____</p>
<b>Кассир</b>	
<b>Квитанция</b>	<p>Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (наименование получателя платежа)</p> <p>7735579027/773501001 40702810100410001663 (ИНН / КПП получателя платежа) (номер счета получателя платежа)</p> <p>в Филиал «Центральный» Банка ВТБ в г. Москве БИК 044525411 (наименование банка получателя платежа)</p> <p>30101810145250000411 в Филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО), г. Москва (Номер кор./сч. банка получателя платежа)</p> <p>_____ (наименование платежа)</p> <p>Ф.И.О. плательщика _____ Адрес плательщика _____ Сумма платежа _____ руб. _00 коп. Сумма платы за услуги _____ руб. ___ коп. Итого _____ руб. __ коп. « ____ » _____ 20 ____ г. С условиями приема указанной в платёжном документе суммы, в т. ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. <b>Подпись плательщика</b> _____</p>
<b>Кассир</b>	

Приглашаем вас к сотрудничеству, просим высылать статьи, а также рекламный материал и сообщения для публикации в соответствии с требованиями журнала. По всем вопросам подписки и приобретения отдельных номеров журнала за 2014–2017 гг. обращайтесь в редакцию ☎ +7 495 229-70-43, ✉ [journal\\_EEM-3@mikron.ru](mailto:journal_EEM-3@mikron.ru)

**ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3.  
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА ©**

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

Журнал издается 4 раза в год с 1965 года.  
Подписано в печать 30.11.2017.

Отпечатано в типографии ООО "Красногорский полиграфический комбинат".  
Номер заказа D-9119.  
✉ 107140, г. Москва, пер. 1-й Красносельский,  
д. 3, оф. 17.

Тираж 500 экз. Цена договорная.

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

**ИЗДАТЕЛЬ**

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

**КОРРЕКТОР:** А. Лужкова

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ВЕРСТКА:** А. Небольсин