

**ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА**

**СЕРИЯ 3**

**МИКРОЭЛЕКТРОНИКА**

Научно-технический журнал

Выпуск 1 (165) 2017

---

**ELECTRONIC ENGINEERING**

**SERIES 3**

**MICROELECTRONICS**

Scientific & technical journal

Issue 1 (165) 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.,

член-корреспондент 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.mikron.ru/journal

Журнал издается с 1965 года

### Учредитель

АО "Научно-исследовательский  
институт молекулярной  
электроники"

## ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИЯ

### Г.Я. КРАСНИКОВ, О.П. ГУЩИН, М.В. ЛИТАВРИН, Е.С. ГОРНЕВ

DSA-комплементарный метод усиления разрешения  
иммерсионной литографии ..... 4

## СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

### Ф.И. ВЫСИКАЙЛО, В.С. МИТИН, А.Ю. ЯКОВЛЕВ, В.В. БЕЛЯЕВ

Модификация свойств наноструктурированных медь-углеродных  
композитных покрытий ..... 18

### С.О. РАНЧИН, И.В. КИРЮШИНА

Свойства буферного травителя оксида кремния и особенности  
использования в технологии интегральных схем ..... 38

### Н.А. КУЗНЕЦОВА, Р.Д. ЭРЛИХ, В.В. СОЛОВЬЕВ

Отечественный фоторезист для взрывной фотолитографии ..... 44

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### Г.Я. КРАСНИКОВ, Е.С. ГОРНЕВ., И.В. МАТЮШКИН

Общая теория технологии и микроэлектроника:  
Часть 1. Уровни описания технологии ..... 51

## НАДЕЖНОСТЬ

### А.В. МАРКИН

Особенности понятия "кратность воздухообмена" применительно  
к чистым помещениям производственного назначения ..... 70

**"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.,  
Corresponding 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.mikron.ru/journal

Journal was published from 1965 year

**Founder**

Joint-Stock Company "Molecular  
Electronic Research Institute"

**PROCESSES AND TECHNOLOGY**

**G.YA. KRASNIKOV, O.P. GUSHCHIN, M.V. LITAVRIN, E.S. GORNEV**

DSA – complementary method of enhancing resolution  
of immersion lithography ..... 4

**PROPERTIES OF MATERIALS**

**P.I. VYSIKAYLO, V.S. MITIN, A. YU. YAKOVLEV, V.V. BELYAEV**

Cooper-carbon nanostructured composite coatings with controlled structure ..... 18

**S.O. RANCHIN, I.V. KIRYUSHINA**

Buffered oxide etcher properties and usage features in the integrated  
circuits technology ..... 38

**N.A. KUZNETSOVA, R.D. ERLICH, V.V. SOLOVYEV**

Domestic photoresist for lift-off photolithography ..... 44

**MATHEMATICAL SIMULATION**

**G.YA. KRASNIKOV, E.S. GORNEV, I.V. MATYUSHKIN**

General theory of technology and microelectronics:  
Part 1. Levels of technology ..... 51

**RELIABILITY**

**A.V. MARKIN**

The features of the concept "ventilation rate"  
in relation to clean rooms for production purposes ..... 70

# DSA – КОМПЛЕМЕНТАРНЫЙ МЕТОД УСИЛЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ИММЕРСИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ

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

За последние несколько лет инновационные методы формирования изображения достигли значительного прогресса. На протяжении десятилетий EUV-литография (extreme ultraviolet) являлась главным кандидатом на усиление разрешающей способности оптической литографии. Этот метод уже сейчас применяется для изготовления пилотных партий как дополнение к иммерсионной литографии. К 2020 году планируется его полное освоение с минимальными проектными нормами 7–5 нм, причем для разрешения 5 нм будет использоваться однократная EUV-литография. Однако даже в этой перспективе не все производители смогут позволить себе использование этой технологии. В то же время альтернативные, или так называемые комплементарные, как для EUVL, так и для иммерсионной литографии, методы усиления разрешения также стремительно развиваются. Метод направленной самосборки (directed self-assembly, DSA) демонстрирует значительный прогресс в развитии, а также в решении проблем по уменьшению дефектности, интеграции в топологию, оптимизации маршрутов. Многолучевая электронная литография (multi-beam electron lithography, ML2) пусть медленно, но прогрессирует в решении проблем, связанных с надежностью и стабилизацией основных точностных параметров.

## DSA – COMPLEMENTARY METHOD OF ENHANCING RESOLUTION OF IMMERSION LITHOGRAPHY

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

Over the past few years, novel lithography techniques have made a significant progress. For decades, the EUV-lithography (EUV) has been a prime candidate to enhance the resolution of optical lithography. This method have already been used for the producing of pilot batches, together with immersion lithography. By 2020 it is planned to complete the development of a "7–5 nm node". These designs will be made by single EUV lithography. However, even in this perspective, not all manufacturers will be able to afford using this technology. At the same time, alternative or complementary for EUVL and for immersion lithography, resolution enhancing techniques have also been rapidly developing. The method of directed self-assembly (DSA) shows significant progress in its development and in addressing the remaining challenges to reduce defects, design integration, as well as route optimization. Multi-beam electron lithography (ML2) also achieved significant progress in addressing the problems associated with the reliability and accuracy stabilization of the main parameters.

## ВВЕДЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ МУЛЬТИПАТТЕРНИРОВАНИЯ

На протяжении почти 30 лет выполнение закона Мура обеспечивала оптическая литография в соответствии с уравнением Релея, определяющим литографическое разрешение:

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

где  $\frac{P}{2}$  – предел разрешения (полушаг),  $\lambda$  – длина

волны источника излучения,  $NA$  – числовая апертура объектива и  $k_1$  – технологический коэффициент, зависящий от многих параметров, например от типа фоторезиста и его контрастности (рис. 1). Уменьшение коэффициента  $k_1$  называется RET-процессом.

Увеличение числовой апертуры до величины 1,33 и уменьшение рабочей длины волны до 193 нм реализованы в ArFi иммерсионных сканерах производства ASML и Nikon с минимальным полушагом 45 нм.

Последующее масштабирование для формирования размеров 32, 28, 22, 16 нм и далее на данный момент связано с применением технологии многократного формирования изображения

(multiple patterning, MP), то есть за счет снижения  $k_1$ . Однако при переходе к размерам  $\approx 10$ –15 нм и ниже реализация такого подхода сталкивается с серьезными проблемами в силу возникающих как экономических (из табл. 1 видно, что увеличение стоимости комплекта фотомасок при дальнейшем масштабировании весьма значительно), так и некоторых физических ограничений [1].

Тем не менее корпорация Intel уже производит продукцию по технологии мультипаттернирования с минимальными проектными нормами 12 нм, а в этом году (2017) будет запущено производство по технологии 10 нм, также с использованием мультипаттернирования, так как на данный момент альтернативы многократному формированию изображения с такими проектными нормами все еще разрабатываются.

Для усиления разрешения и снижения стоимости производства создаются литографические методы нового поколения (next generation lithography, NGL). Это, прежде всего, EUV-литография (extreme ultraviolet lithography,  $\lambda = 13,56$  нм), нанопринтинг (nanoimprint lithography, NIL), направленная самосборка (directed self-assembly, DSA) и многолучевая электронная литография (multi-beam electron lithography, ML2) [2].

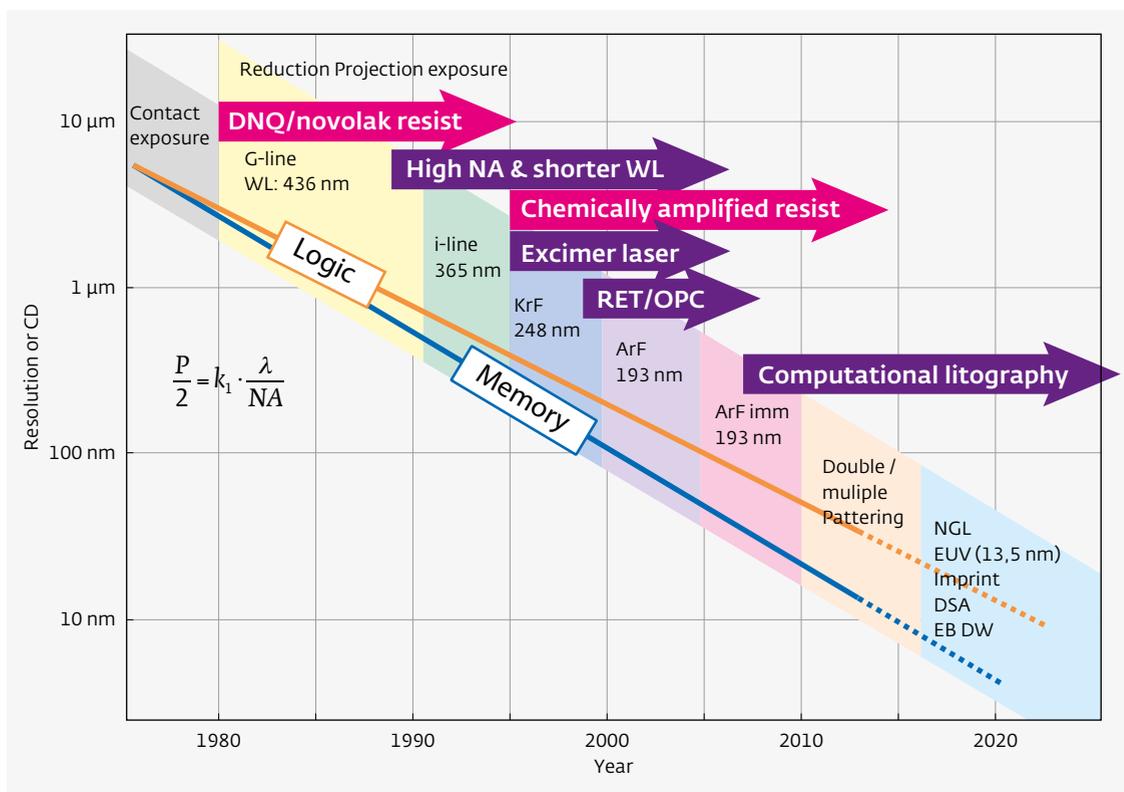


Рис. 1. Развитие оптической литографии

**Таблица 1.** Стоимость сканеров и комплектов фотомасок для критических слоев для различных топологических норм

Минимальный размер, нм	Сканеры ASML	Вероятная стоимость сканера ASML, млн долл.	Стоимость комплекта фотомасок для 15 критических слоев, млн долл.
65	Twin Scan XT:1250 (сухой)	≥ 16	0,6
45	Twin Scan XT:1950i (иммерсия)	≥ 50	0,9
32	Twin Scan XT:1970 Ci (иммерсия)	≥ 70	1,05
28	Twin Scan XT:1970 Ci (иммерсия)	≥ 70	1,1
22	Twin Scan XT:1970 Ci (иммерсия)	≥ 70	1,5
7	EUV с NA > 0,55 (2020)	≥ 100	15

## ТЕКУЩИЙ СТАТУС МЕТОДОВ NGL (EUV, DSA, ML2) EUV литография

У основных производителей большие ожидания связаны с EUV-литографией, которая предполагает усиление разрешения за счет дальнейшего уменьшения длины волны  $\lambda$  до 13,56 нм. Первые результаты с применением данного подхода были получены еще в ~1985 году, и спустя 5 лет этот метод был интегрирован в дорожную карту ITRS [3]. EUV-литография является наиболее перспективным среди NGL методом, в разработку которого уже вложены огромные средства. Однако, на данный момент выходу EUV на уровень массового производства (HVM) препятствует комплекс не полностью решенных проблем. Основной из них остается увеличение мощности источника. Решение этой задачи позволит поднять производительность до приемлемого для HVM уровня. Проблемы получения достаточно стабильных пелликов (защитная пленка для фотомаски, уменьшение дефектности фотомаски и ее контроля также требуют пристального рассмотрения. Для улучшения показателя LER необходимо увеличить контрастность и чувствительность, для чего разрабатывается новая химия EUV-резистов. Из-за этих и других проблем EUV-литография, реализованная фирмой ASML, уже в нескольких поколениях литографов пока применяется основными производителями только для изготовления пилотных партий. Тем не менее, весьма ощутим неуклонный прогресс в EUV-литографии. Так, в феврале 2015 года ASML сообщила, что TSMC удалось достигнуть проработки 1 022 пластин в сутки на сканере NXE3300B. Аналогичные результаты получены и в Итес в 2016 году [4]. В конце февраля 2017 года

ASML анонсировала выпуск новой модели EUV сканера NXE:3400B с производительностью до 125 пл/ч (вследствие недостаточной пока мощности источника излучения сейчас производительность этого сканера подтверждена на уровне 104 пл/ч) – применение EUV в производстве для критических слоев уже возможно. Для сравнения: заявленная производительность последней модели иммерсионного сканера от Nikon NSR-S630D составляет 250 пл/ч.

Как представлено в одном из последних пресс-релизов фирмы ASML, лидера в разработке проекционных оптических систем, ASML недавно инвестировала 1 млрд евро в приобретение 24,9% Carl Zeiss SMT, дочернего предприятия Carl Zeiss SMT, и намерена потратить еще ~760 млн евро в течение следующих шести лет. Эти средства направляются на R&D принципиально новой NA (числовая апертура) для EUV-литографа. Достижение  $NA > 0,5$  позволит реализовывать в том числе структуры с полушагом от 8 до 3 нм, для чего в литографе планируется использовать анаморфные зеркала для уменьшения затеняющих эффектов от наноразмерных структур маски. Продуманный дизайн при проектировании зеркал может позволить новому литографу с  $NA > 0,5$  работать с тем же источником излучения и резистами [5]. Как показано на рис. 2, выпуск EUV-сканера с  $NA > 0,5$  и производительностью 185 пл/ч запланирован на 2020 год.

Однако пока не ясно, как для топологий с нормами 5 нм и ниже будет обеспечиваться необходимая точность совмещения слоев – для технологии 5 нм максимально допустимая ошибка равна 2 нм. При этом можно показать, что при длине волны ~13,5 нм EUVL за счет аберрации в отражающих зеркалах отклонения в точности проекции могут дости-

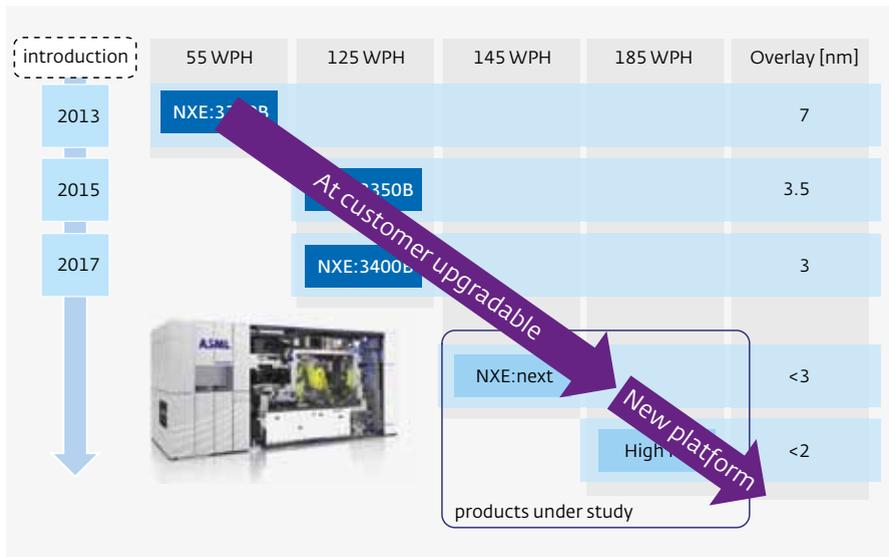


Рис. 2. Планы ASML на EUV-сканеры по производительности и точности совмещения с учетом перехода на NA 0,5

гать 3 нм. Эти отклонения можно измерить и компенсировать в фотомаске, но тогда каждая из них будет подходить только для конкретной экспонирующей установки [6].

Ожидается, что одна такая EUV-система от ASML для массового производства (HVM) будет стоить ~100 млн долл. Предоставленные ASML в прошлом году на Дне инвестора, 31 октября 2016 года, расчеты показывают, что для передового производства логики с проработкой ≈ 45k пластин в месяц необходимо приобрести 7–12 систем EUV для обработки 6–10 EUV-слоев в маршруте производства 7 нм. Предполагая, что каждая установка будет стоить >100 млн долл., ведущим производителям логики придется вложить ≈ 1 млрд долл. для возможности использовать EUV для критичных слоев в масштабах такого производства. Становится понятным, что большинство ведущих производителей намерены на протяжении еще нескольких лет продвигать уже хорошо освоенную иммерсионную ArFi литографию с мультипаттернированием (MP), дополняя ее на экстремальных слоях литографическими методами DSA либо многолучевой электронной литографией ML2. Вопрос по инвестированию в сканер EUV с числовой апертурой NA > 0,5 NA, очевидно, откладывается на следующее десятилетие, когда все технические вопросы, включая производительность и доступность по стоимости, будут решены.

Ввиду высокой стоимости оборудования для EUV, в промышленном производстве данный метод, очевидно, смогут реализовать только такие гиганты,

как Intel, Samsung Electronics, TSMC, Global Foundries, которые занимают основные ниши мирового рынка в производстве микросхем и производят очень большое количество продукции, включая ее номенклатуру. Так, компания Intel в 2020 году планирует начать массовый выпуск продукции по технологии 7–5 нм с использованием только EUV-экспонирования на строящемся новом производстве Fab 42 в Аризоне [7]. Стоит также отметить, что последующий переход к минимальным размерам 3 нм уже заявлен для EUV. Однако менее крупные компании, очевидно, не смогут применить данный подход из-за огромных начальных капиталовложений.

Им придется искать другие альтернативы, совершенствующие, либо заменяющие мультипаттернирование.

### Комплементарные DSA- и ML2-литографии

Все больше ожиданий, согласно возрастающему числу докладов на последних конференциях SPIE, связано с разработкам в области DSA и ML2, именно как методами, дополняющими иммерсионную литографию и позволяющими уйти от мультипаттернирования на самых дорогих, экстремальных слоях формирования линий металлизации Me1–Me2, а также контактных и переходных окон.

В работе [1] представлена концепция замены тройного паттернирования SAQP иммерсионной литографии при подрезании линий металлизации Me2 на многолучевую электронную литографию ML2, то есть вместо трех фотомасок применяется однократное экспонирование электронными лучами литографом Mapper FLX-1200. Метод ML2 позиционируется в дорожной карте ITRS как минимум с 2001 года, и все это время развитие многолучевой электронной литографии не стояло на месте. Однако пока не полностью решены проблемы, связанные с заявленной производительностью, точностью совмещения слоев с проекционным литографом в режиме Mix and Match и надежностью. Фирме Mapper Lithography понадобится еще не менее двух лет на решение этих проблем.

Остановимся более подробно на интенсивно разрабатываемом сегодня комплементарном методе усиления разрешения DSA и рассмотрим текущую ситуацию с развитием этого метода.

Первые результаты по методу DSA были получены в ≈2002 году, а в 2007 году этот подход был включен в дорожную карту ITRS [3]. Несмотря на то, что аналогичные события для EUV-литографии произошли на ≈15 лет раньше, доведение метода DSA до стадии массового производства отстанет от аналогичной стадии для EUV не более чем на ≈1-2 года.

В октябре 2016 года в IMEC прошел Второй международный симпозиум по развитию технологии DSA, где было представлено более 50 докладов от ведущих мировых центров с участием 17 компаний мирового уровня.

### DSA: механизм усиления разрешения

Общая схема процесса усиления разрешения методом DSA включает в себя следующие стадии:

- формирование направляющей структуры иммерсионной литографией;
- нанесение в сформированную направляющую структуру композиции блок-сополимера и ее последующий отжиг (при этом блок-сополимер разделяется на разные фазы);
- селективное удаление одной из образовавшихся фаз и перенос изображения традиционными методами в слой, лежащие ниже.

Рассмотрим сначала механизм возникновения самосборки.

Как известно, принципиальная возможность самопроизвольного перехода термодинамической системы из состояния 1 в состояние 2 определяется знаком приращения энергии Гиббса (если в этой термодинамической системе постоянны давление, температура и число частиц):

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2)$$

(эта формула описывает приращение энергии Гиббса);

$$\Delta G_{12} = \Delta G_2 - \Delta G_1 > 0 \quad (3)$$

(в этом случае самопроизвольный переход принципиально невозможен);

$$\Delta G_{12} = \Delta G_2 - \Delta G_1 < 0 \quad (4)$$

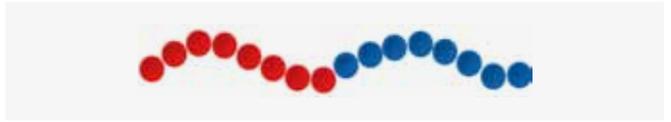


Рис. 3. Блок-сополимер

(в этом случае самопроизвольный переход принципиально возможен, но не обязателен).

Как видно из уравнения (2), в выражение для приращения свободной энергии входят как энтальпийный, так и энтропийный члены, причем энтропийный член уменьшается с понижением температуры. Таким образом, при снижении температуры ниже некоторого значения  $T_0$  становится принципиально возможным переход системы в другое, более упорядоченное, состояние (при таком переходе  $\Delta S < 0$ ).

Рассмотрим эту ситуацию на примере диблок-сополимеров – полимеров, состоящих из мономеров двух типов, А и В, расположенных таким образом, что каждый из двух типов мономеров образует цепь, и эти цепи соединяются, составляя единую сополимерную цепочку (рис. 3). При высоких температурах вклад энтропийного члена в приращение свободной энергии высок, поэтому полимерный расплав сильно разупорядочен, блоки А и В распределены по всему объему равномерно, вариации распределения блоков А и В в пространстве, даже с учетом флуктуаций, незначительны. Ниже определенной температуры полимерный расплав упорядочивается,

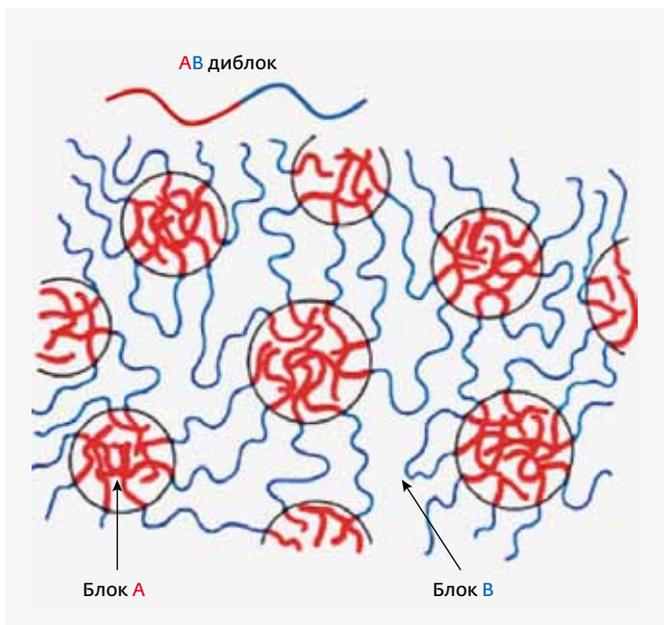


Рис. 4. Самосборка блок-сополимера

что выражается в разделении блоков А и В с формированием регулярных, периодических структур (т.е. происходит самосборка) (рис. 4), причем в экспериментах наблюдается множество экзотических геометрий этих структур. Таким образом, сегменты каждой из цепей А и В собираются вместе и образуют макроскопический порядок. В экспериментах наиболее часто наблюдались линии (Lamellar), гексагональные цилиндры (Hexagonal) и сферы (объемноцентрированная кубическая решетка, Cubic) (см. рис. 5) [8].

В литографии находят применение ламеллярная и цилиндрические структуры. Их используют, соответственно, для уменьшения размеров регулярных линий (line and space structure, L/S) и контактных окон (contact hole, C/H).

Применение блок-сополимеров (либо полимерных смесей) оправдано, поскольку высокомолекулярные системы обладают значительно меньшей

по модулю энтропией смешения ( $\Delta S$ ), чем низкомолекулярные системы [9]. Преимущество же блок-сополимеров в сравнении с полимерными смесями заключается в том, что в сополимерах между блоками действуют ковалентные силы притяжения, противодействующие расслоению, вследствие чего разделение получается не макрофазным, а микрофазным.

Конфигурация образовавшихся фаз (здесь и далее по умолчанию рассматриваются только диблок-сополимеры), как показано на рис. 5, определяется числом статистических сегментов в цепи блок-сополимера (т.е. числом А и В звеньев), параметром взаимодействия  $\chi$  его составляющих, а также мольным соотношением этих составляющих.

Как будет показано далее, чем меньше размер структуры, тем длина цепочки блок-сополимера должна быть короче. А значит, тем выше будет модуль энтропии смешения (т.к. система станет

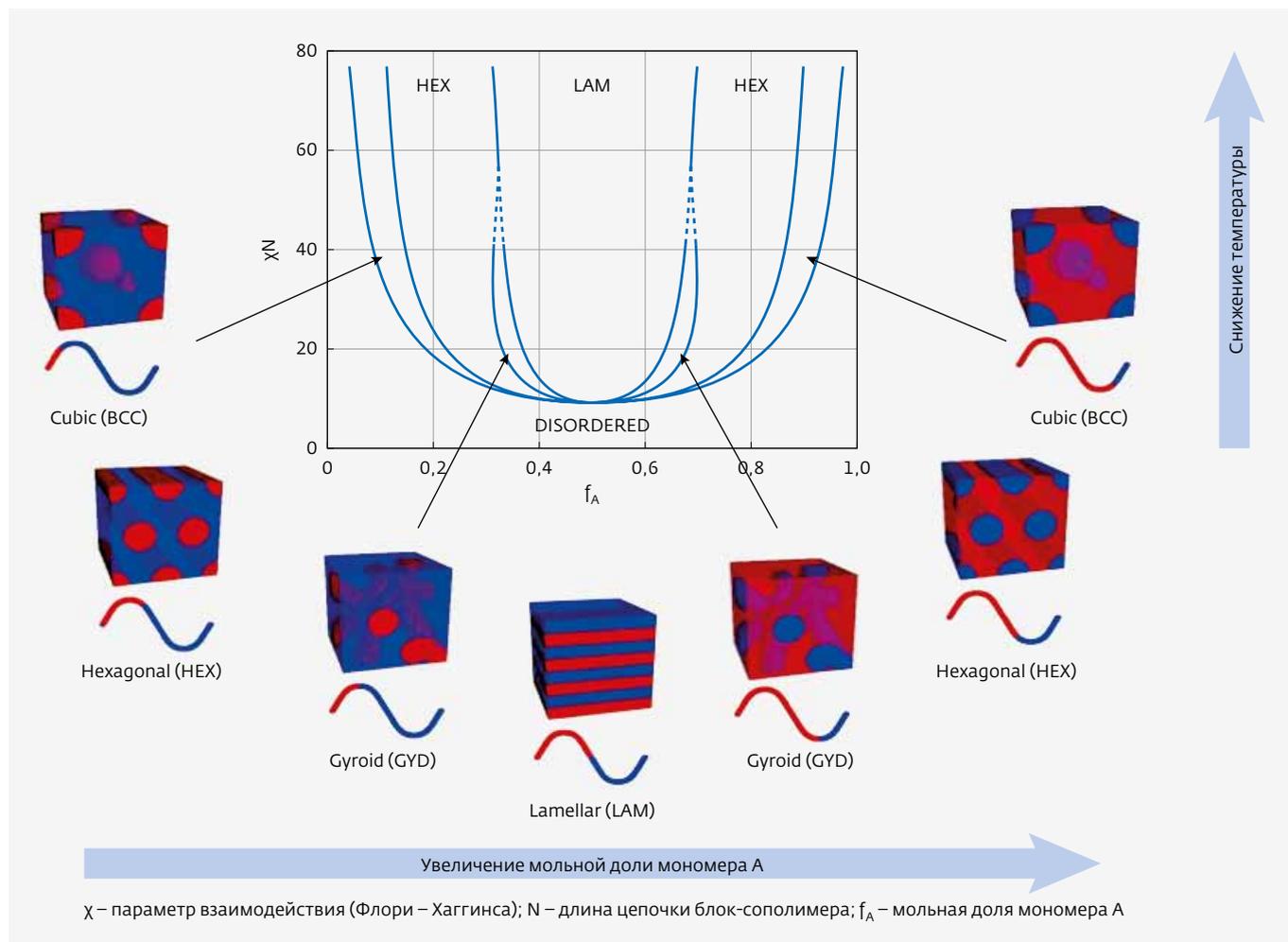


Рис. 5. Факторы, влияющие на форму образующихся в результате самосборки структур

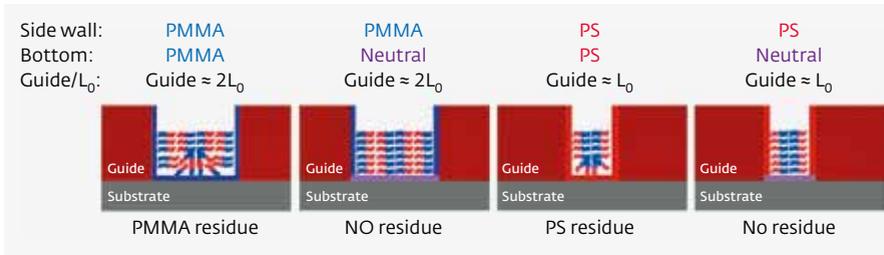


Рис. 6. Примеры дополнительного средства, а также образования пленки на "дне" структуры

более "низкомолекулярной"). Эту проблему можно решить за счет использования составов с большим значением параметра взаимодействия, определяющегося формулой:

$$\chi = \frac{1}{kT}(\epsilon_{AB} - \frac{1}{2}(\epsilon_{AA} + \epsilon_{BB})), \quad (5)$$

где  $\epsilon_{AB}$  – энергия взаимодействия мономера А с мономером В,  $\epsilon_{AA}$  и  $\epsilon_{BB}$  определяют аналогично [10]. Параметр показывает степень несовместимости составляющих блок-сополимера, то есть чем выше величина, тем легче происходит разделение блок-сополимера на фазы, тем ниже энтропия смешения. Так, чем выше значение, тем выше

контрастность изображения [11].

### УПРАВЛЕНИЕ САМООРГАНИЗАЦИЕЙ

Для управления самоорганизацией определенным участкам сформированной иммерсионной литографией направляющей структуры придают дополнительное средство к составляющим одного из блоков сополимера,

то есть уменьшают их энергию взаимодействия. Благодаря этому притяжение к указанным участкам структуры упомянутого типа блоков будет значительно сильнее (рис. 6). В зависимости от типа направляющей структуры выделяют два метода самоорганизации: метод хемозпитаксии и метод графоэпитаксии. В табл. 2 приведена номенклатура типичных слоев, используемых в этих двух маршрутах самоорганизации.

Особенностью метода хемозпитаксии (рис. 7) является то, что блок-сополимер наносится на относительно плоскую направляющую структуру. Соответственно, основным преимуществом такого подхода является более высокая эффективная площадь

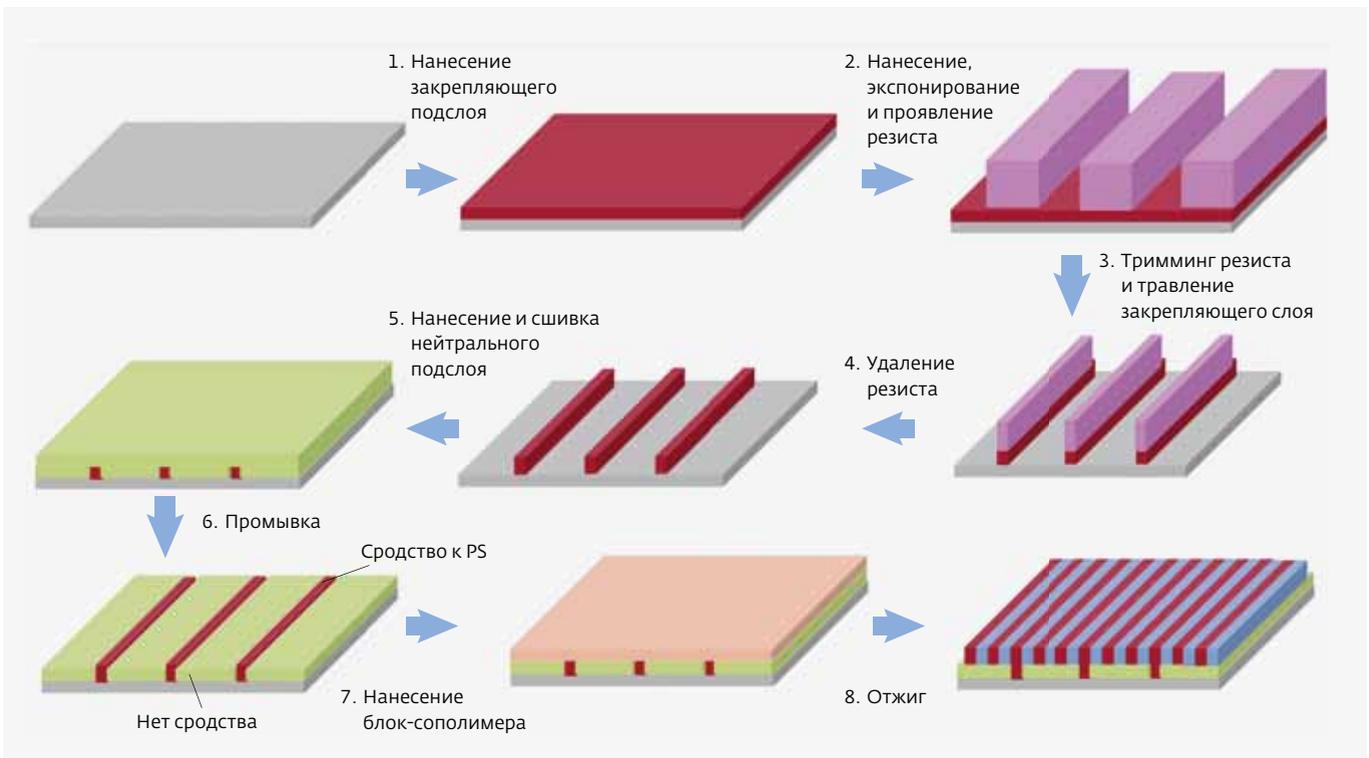


Рис. 7. Пример маршрута хемозпитаксии для формирования структур L/S (маршрут LiNe – Liu-Nealey)

и высокая частота мультипликации – 4–5X (т.е. шаг DSA-структуры меньше шага направляющей структуры в 4–5 раз) [12]. Этот метод применяется в основном для уменьшения размеров линий [3].

Рассмотрим подробнее пример маршрута хемоэпитаксии, изображенный на рис. 7 (в данной статье будет уделено внимание хемоэпитаксии только с плоскими направляющими) [13, 14]. На предварительно сформированный стек жесткая маска (hardmask) – антиотражающее покрытие (ARC), либо на эквивалентный по функциям слой [15] – наносится закрепляющий подслой, на котором после высокотемпературной термообработки  $\approx 315^\circ\text{C}$  посредством иммерсионной литографии (ArFi) и плазмохимического тримминга формируются нерегулярные (т.е. не имеющие полушага) линии (этапы 1–4); закрепляющий подслой имеет дополнительное сродство к одному из компонентов блок-сополимера и, таким образом, служит для координатной привязки получающихся доменов; материалом для закрепляющего подслоя, как правило, является сшивающийся полистиролсодержащий состав (cross-linkable polystyrene), сшивка происходит в процессе отжига. На этапах 5–6 на поверхность с сформированным рисунком из закрепляющего подслоя наносится нейтральный подслой (brush, neutral layer), проводится его отжиг, а затем излишки (до вскрытия закрепляющего подслоя) удаляются растворителем; нейтральный подслой имеет одинаковое сродство к обоим составляющим сополимера. Наконец, на полученную направляющую структуру наносится раствор блок-сополимера (этап 7), проводится его отжиг и самоорганизация (этап 8). Затем с помощью травления – в большинстве слу-

чаев сухого – осуществляется селективное удаление одного из типов доменов и далее полученная топология структуры переносится в слой подложки, также с помощью сухого травления. Все упомянутые термообработки в зависимости от маршрута могут требовать проведения их в атмосфере  $\text{N}_2$ . Основная роль нейтрального подслоя состоит в обеспечении "нейтральности" поверхности, на которой происходит самосборка, к обоим составляющим блок-сополимера, что позволяет избежать образования приповерхностного слоя устойчивой к травлению составляющей (рис. 6). Это приведет к резкому сужению окна процесса [16, 17]. Поэтому обычно ширина линий в закрепляющем подслое соразмерна ширине домена блок-сополимера.

В методе графоэпитаксии (рис. 8–9) направляющие структуры являются топографическими (т.е. "выступают" из плоскости и их высота не меньше высоты доменов блок-сополимера), и блок-сополимер наносится в промежутки между ними. Данный метод позволяет формировать более сложные топологии, чем метод хемоэпитаксии [18], за счет более простого варьирования формы направляющей структуры и дает возможность достичь лучшего контроля ориентации доменов, пусть и при сниженной эффективной площади [12]. Основное применение графоэпитаксии – уменьшение размеров и мультипликация контактных окон, что на текущий момент является основным трендом предполагаемого внедрения DSA, но также этот метод применяется и для формирования структур L/S (т.е. регулярных линий) [3].

На схеме маршрута, изображенного на рис. 8, показано формирование регулярных линий мето-

**Таблица 2.** Функции литографических слоев в маршрутах DSA

Слой	Функция
Резистивный стек ARC – жесткая маска	Поглощение стоячих волн, увеличение селективности к маске при травлении
Направляющая структура (состоит из нейтрального и закрепляющего подслоев)	Направление ориентации блок-сополимера
Закрепляющий подслой	Притяжение одной из составляющих блок-сополимера
Нейтральный подслой	Предотвращение параллельной ориентации доменов блок-сополимера
Блок-сополимер	При сегрегации образует слои либо цилиндры
Верхнее покрытие (опционально)	Поддерживает ориентацию доменов блок-сополимера при самоорганизации

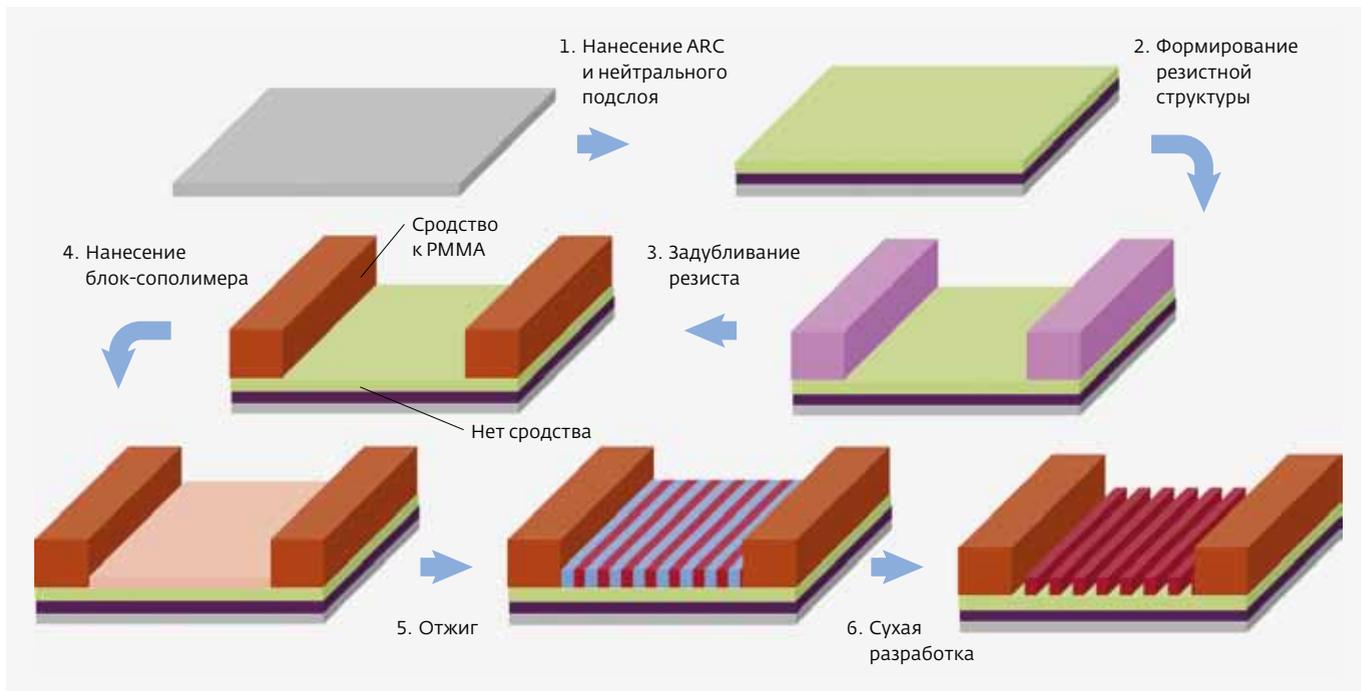


Рис. 8. Пример маршрута графоэпитаксии для формирования структур L/S

дом графоэпитаксии. На этапах 1–2 на подложку наносится стек из антиотражающего покрытия (ARC) и нейтрального слоя, либо материал, аналогичный по функциям упомянутому стеку. Затем, в результате нанесения, экспонирования, проявления и задубливания резиста, формируется топологическая направляющая структура со сродством к одной из составляющих (этапы 3–4), как правило, к полиметилметакрилату, если, конечно, в качестве блок-сополимера используется полистирол-полиметилметакрилат (PS-*b*-PMMA) [17]. Далее наносится сам блок-сополимер, проводится его отжиг, а затем селективно удаляются определенные домены, обычно путем травления в плазме (этапы 5–6). В некоторых вариантах маршрута нанесение нейтрального слоя производится непосредственно после задубливания топологии, сформированной в резисте.

Маршрут формирования контактных окон методом DSA (рис. 9) принципиально отличается от маршрута формирования регулярных линий лишь формой направляющей структуры.

Значительная часть маршрутов DSA предполагает в конечном итоге формирование регулярных структур, что было бы невозможно, не будь разделение материала (блок-сополимера) микрофазным. В маршрутах формирования методом DSA изолированных линий, либо изолированных контактных

окон вместо блок-сополимеров можно использовать полимерные смеси, поскольку в этих случаях макрофазной сегрегации также достаточно [19].

В некоторых вариантах маршрутов для улучшения контроля ориентации доменов может применяться дополнительное верхнее покрытие, наносимое на слой блок-сополимера (перед проведением самосборки). Для этой цели, а также для повышения селективности травления возможна химическая модификация блок-сополимера [20, 21], однако в большинстве случаев при использовании таких химически модифицированных блоков возникают трудности с термическим отжигом, прежде всего, с контролем ориентации за разумное время [13]. Возможно также проведение отжига в парах растворителя (для улучшения контроля ориентации) [22–24], а также комбинирование этого метода с химическими модификациями. Однако такие дополнения ведут к увеличению стоимости и сложности маршрутов, а также к снижению производительности. Поэтому сейчас активно разрабатываются материалы для направляющих структур и маршруты для таких материалов [13, 25]. Это снизит необходимость применения вышеописанных модификаций.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Заметные результаты достигнуты за последние годы в уменьшении критических размеров сформиро-

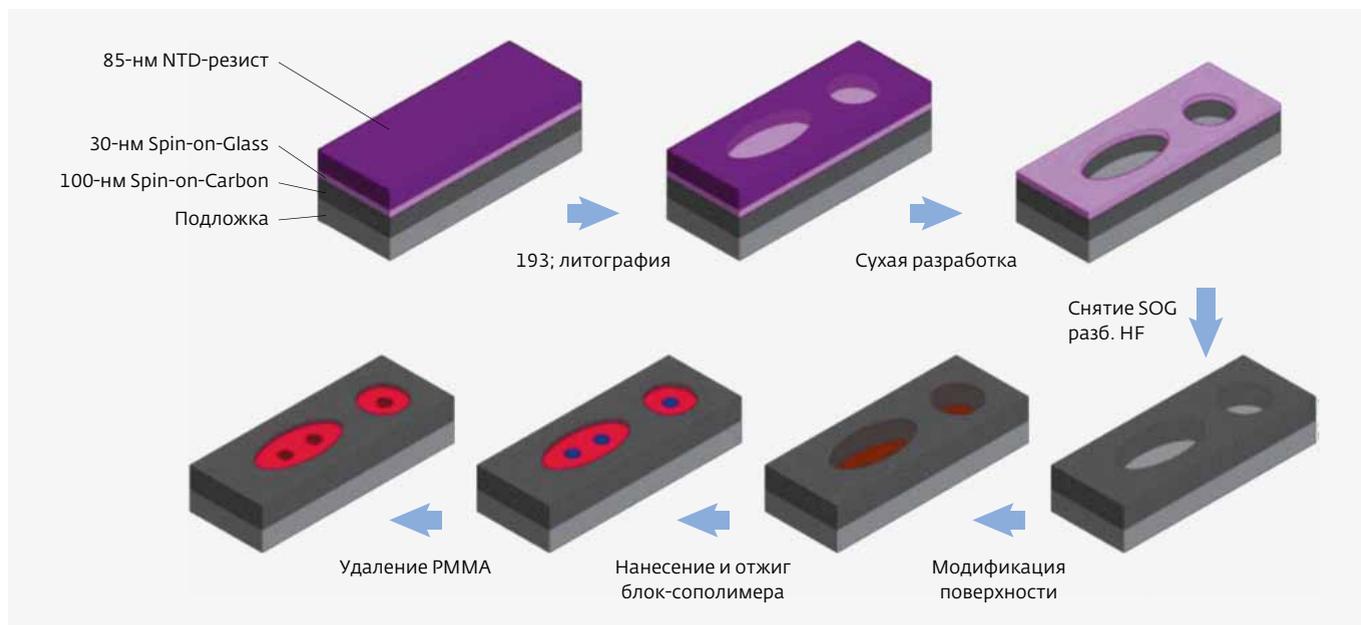


Рис. 9. Пример маршрута графоэпитаксии для формирования контактных окон

ванных структур, что представлено в динамике на рис. 10 [3].

С помощью правильно подобранных форм направляющих структур можно получить сложные конфигурации контактных окон, примеры приведены на рис. 11. Размеры изображенных контактных окон  $\approx 22$  нм [18].

На рис. 12 показаны SEM-снимки массива структур линий L/S, сформированных методом хемозпитаксии (маршрут LiNe). Период использованного блок-сополимера  $L_0 = 17$  нм, шаг структуры = 84 нм ( $\approx 5 L_0$ ), ширина линий = 8 нм ( $\approx 0,5 L_0$ ). Такой выбор размеров позволяет добиться мультипликации 5X. Длина шкалы = 500 нм [13].

### АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ DSA

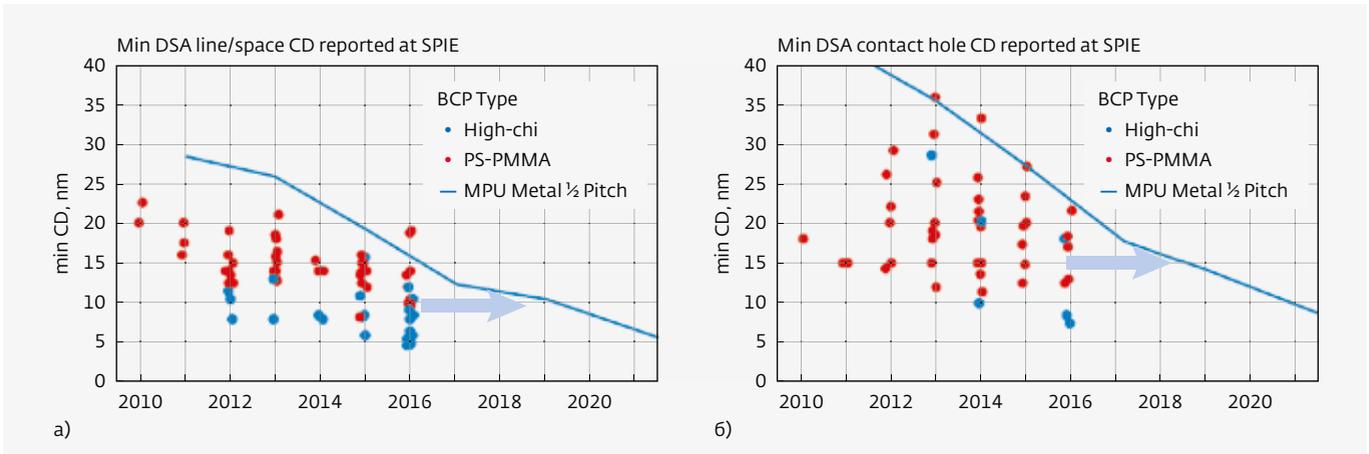
Одной из ключевых проблем DSA пока остается дефектность процесса [3]. Значительный вклад, особенно при использовании маршрута LiNe, вносят дефекты в нейтральном слое, так как вследствие загрязнений может ухудшиться "нейтральность" этого подслоя, что приведет к искажениям положения доменов и их формы в горизонтальной плоскости. Чистота и монодисперсность блок-сополимера и чистота других материалов для процессов DSA, очевидно, также играют решающую роль. Над этим вопросом работают, в том числе такие материаловедческие компании, как ARKEMA и BREWER Science, которые сейчас являются основными раз-

работчиками и поставщиками материалов для DSA. Следует отметить, что за последнее время в контроле дефектности процесса DSA достигнут ощутимый прогресс. Для внедрения маршрутов DSA в массовое производство уровень дефектности должен быть  $10^{-2}$  см<sup>-2</sup>, что на два порядка ниже ее текущего уровня (рис. 13). Если темпы снижения количества дефектов останутся прежними, приемлемый уровень будет достигнут к 2018 году [3]. Снижения плотности дефектов можно добиться за счет увеличения времени отжига, однако такой подход значительно снизит выигрыш от применения метода DSA в экономическом плане [26].

Показатели LER/LWR в маршрутах DSA также нуждаются в некоторых улучшениях (LER/LWR – для линий, CDU – для контактных окон). Касательно этого вопроса, стоит уделить внимание не столько контролю самосборки, сколько контролю дальнейшего переноса изображения в подложку, в частности, оптимизировать травление нейтрального слоя и жесткой маски [27].

С показателями CDU (однородность минимального размера) ситуация обстоит лучше. Уже получены результаты с приемлемыми, даже для массового производства HVM, значениями CDU [3].

Вследствие того что метод DSA появился относительно недавно, пока еще не созданы отработанные схемы контрольных операций. Накопление статистических данных на данный момент еще продолжается. Также не достигнуто полное понимание



**Рис. 10.** Динамика уменьшения минимальных CD размеров линий и контактных окон, реализованных DSA методом и представленных на SPIE конференциях

некоторых сопутствующих процессов; на основе экспериментов проводится коррекция существующих физических моделей [3].

Решающий вклад в исследования и разработку всего комплекса метода DSA вносит французская лаборатория CEA-Leti, которая в рамках международной программы IDeAL привлекла для разработки всех аспектов метода DSA крупнейших специалистов по материалам, технологиям, оборудованию, программному обеспечению, ARKEMA, LCPO, BREWER Science, NOVA, SCREEN, TEL, MENTOR [28, 29].

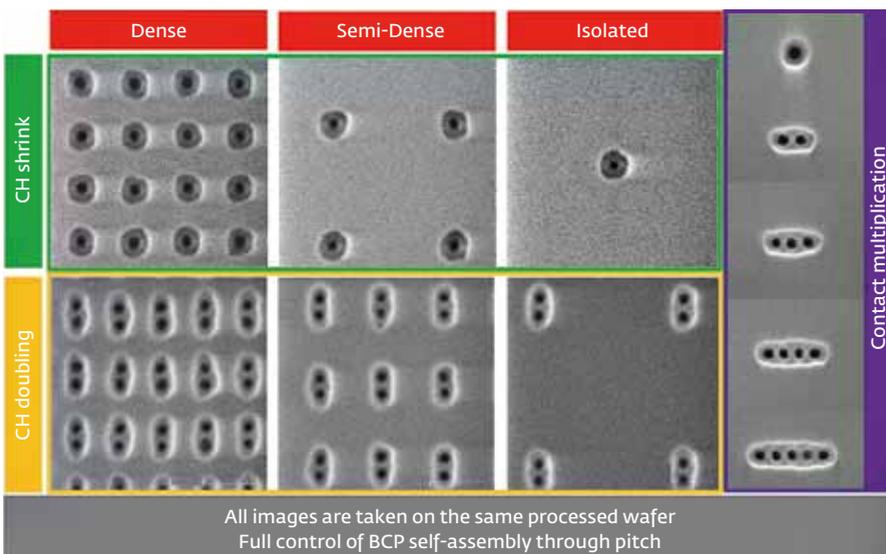
По мнению большинства специалистов, первым внедренным в производство маршрутом DSA

станет уменьшение размеров контактных окон с помощью графоэпитаксии для топологических размеров 20–30 нм. Внедрение ожидается в течение 2–5 лет [3].

В качестве блок-сополимера сейчас наиболее часто применяется PS-b-PMMA благодаря высокой селективности травления его составляющих, однако использование этого состава для получения структур с размерами 10 нм и ниже довольно сомнительно в силу того, что его сегрегация на таких размерах недостаточно сильна (низкий  $\chi$ ). Поэтому значительное внимание сейчас уделяется разработке материалов с высоким параметром  $\chi$  (так называемые high- $\chi$  materials, HC) для определения лучшего кандидата на внедрение в производство [11, 30, 31].

Также возможны модификации PS-b-PMMA, повышающие его параметр  $\chi$  [32].

Необходимо отметить, что методом DSA можно усиливать разрешение не только иммерсионной литографии. В этом направлении для нас представляет интерес недавняя публикация от фирмы Brewer Science о разработке DSA-процесса с применением сухого DUV ASML TWIN SCAN XT:1250D сканера с разрешающей способностью 75 нм [15]. После проведения литографии направляющих на этом сканере был выполнен маршрут графоэпитаксии с формированием



**Рис. 11.** Результаты DSA при формировании контактных окон ( $CD \approx 22$  нм) разной конфигурации

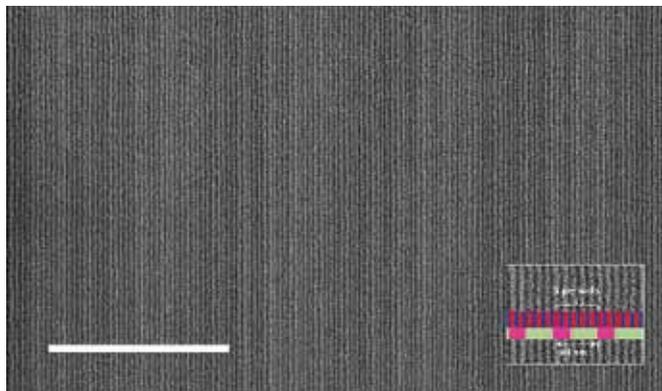


Рис. 12. Результаты DSA при формировании регулярных линий ( $CD=8,5$  нм)

линий с размерами 26 нм. Эти результаты показывают актуальность метода DSA для отечественной микроэлектроники как одного из перспективных методов усиления разрешения литографии [33].

Методом DSA нельзя сформировать структуры с размерами, значительно превышающими период блок-сополимера  $L_0$ . Поэтому для увеличения верхнего предела DSA также ведется разработка составов блок-сополимеров с большим значением  $L_0$  ( $\approx 60$  нм).

## ВЫВОДЫ

Согласно ITRS lithography roadmap 2011, EUV-литография представлена основным методом после AgFi иммерсионной литографии. Предполагалось, что в 2012 году начнется интеграция EUV в производство, а с 2014 года начнется массовый выпуск продукции. Однако проблемы производительности, связанные с увеличением мощности источников EUV и доступности оборудования, привели к тому, что только сейчас EUV начала использоваться для выпуска пилотных партий, в основном в комбинации с иммерсионным мультипаттернированием, которое также не стояло на месте, и в настоящее время SAQP четырехкратное экспонирование вполне осуществимо. За это же время предел разрешения EUV был продвинут до 7, 5 и 3 нм.

В то же время значительный прогресс был достигнут в разработке технологии DSA. Этот комплементарный метод заметно приблизился к производственной реализации. DSA, не являясь самостоятельным литографическим методом, не требует разработки и создания нового дорогостоящего технологического оборудования. Если проблемы DSA, касающиеся дефектности, точности позиционирования, а также интегрирования в существующие

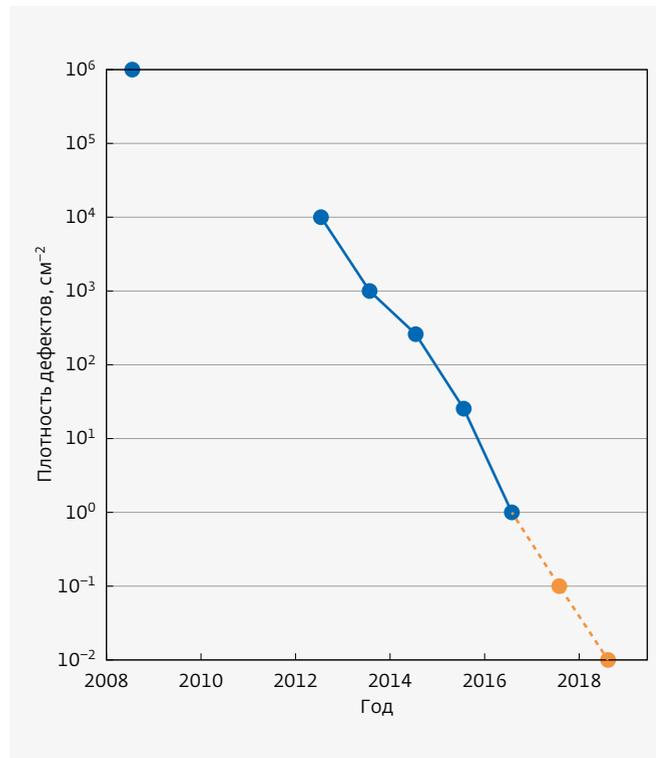


Рис. 13. Наилучшая плотность дефектов в маршруте DSA

КМОП-процессы, будут решены в разумные сроки, эта технология позволит заметно снизить, в сравнении с мультипаттернированием, стоимость формирования изображения, а также повысить качество и уменьшить размер "однократных" рисунков вне зависимости от метода формирования направляющей структуры. Предстоящая замена в DSA полистирола-полиметилметакрилата на новые HC-материалы (high chi) предполагает уменьшение предельного разрешения DSA с 15–10 до 5 нм.

В отечественной микроэлектронике, в производстве, достигнут минимальный размер 65 нм и рассматривается дальнейшее его масштабирование. Однако пока российский рынок микроэлектроники отличается малыми объемами и большой номенклатурой изделий. В этих условиях создание новых производств, с большими капитальными затратами на высокопроизводительное иммерсионное для мультипаттернирования, либо EUV-оборудование, вряд ли является актуальным. Решением вопроса, позволяющим значительно снизить капитальные затраты и обеспечить усиление разрешения в два-три раза на экстремальных слоях КМОП-маршрута с использованием имеющегося поколения сухих AgF-сканеров, могло бы стать применение компле-

ментарных методов DSA и ML2. Разработка по усилению разрешения методом DSA на базе сухого DUV ASML Twin Scan XT:1250D сканера была показана выше [15]. Отечественные научные школы по разработке химии блок-сополимеров и их производству хорошо представлены в нашей стране [34, 35].

## ЛИТЕРАТУРА

- Zhao L., Wei Y., Ye T.** Analysis of Multi-e-beam Lithography for Cutting Layers at 7 nm // *Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, 15(4), 043501, 2016. P. 043501-1-043501-8.
- Neisser M., Wurm S.** ITRS lithography roadmap: 2015 challenges // *Adv. Opt. Techn.* 2015. P. 235-240.
- Directed Self-Assembly (DSA): Progress Toward Manufacturing Readiness / *SolidState Technology/ Brewer Science*. URL: <https://www.webcaster4.com/Webcast/Page/721/15354> (дата обращения 20.11.2016).
- Lammers D.** Innovations at 7 nm to Keep Moore's Law Alive // *Semiconductor Manufacturing & Design COMMUNITY*. 2017. URL: <http://semimd.com/blog/tag/tsmc/> (дата обращения 2.03.2017).
- Korczyński E.** High-NA EUV Lithography Investment // *Semiconductor Manufacturing & Design COMMUNITY*. 2016. URL: <http://semimd.com/blog/2016/11/28/high-na-euv-lithography-investment/> (дата обращения 2.03.2017).
- Korczyński E.** EUVL Masks may need to be Tool-Specific // *Semiconductor Manufacturing & Design COMMUNITY*. 2017. URL: <http://semimd.com/eds-threads/2017/03/07/euvl-masks-may-need-to-be-tool-specific/> (дата обращения 9.03.2017).
- Intel announces \$7B investment in next-gen semiconductor fab in Arizona / *SolidState Technology*. 2017. URL: <http://electroiq.com/blog/2017/02/intel-announces-7b-investment-in-next-gen-semiconductor-fab-in-arizona> (дата обращения 2.03.2017).
- Diblock Copolymers // *Massachusetts Institute of Technology*, 2012. URL: <http://www.mit.edu/~8.334/grades/projects/projects10/AlexanderParageorge/Page6.html> (дата обращения 2.03.2017).
- Хохлов А.Р.** Нанотехнологии и "мягкая" материя / *Лекции НОЦ по нанотехнологиям в 2009 году: "Фундаментальные основы нанотехнологий"*, 2009.
- Ермаков С.Н., Кравченко Т.П.** Совместимость полимеров. Термодинамические и химические аспекты // *Пластические массы*. 2012. № 4. С. 32-39.
- Durand W.J., Blachut G., Maher M.J. [et al.]** Design of high- $\chi$  block copolymers for lithography // *Journal of Polymer Science, Part a: Polymer Chemistry*, 53, 2015. P. 344-352.
- Gronheid R., Pollentier I., Younkin T. [et.al.]** Addressing the challenges of directed self-assembly implementation // *Litho Extension Symposium*, 2011.
- Hirahara E., Paunescu M., Polishchuk O. [et al.]** Directed self-assembly of topcoat-free, integration-friendly high- $\chi$  block copolymers // *Proc. of SPIE*, 9425, 2015. P. 94250-1-94250-11.
- Gronheid R., Rincon-Delgadillo P., Pathangi H. [et al.]** Defect reduction and defect stability in Imec's 14nm half pitch chemo-epitaxy DSA flow // *Proc. of SPIE*, 9049, 2014. P. 904905-1-904905-10.
- Guerrero D.J., Hockey M.A., Wang Y. [et al.]** Multifunctional hardmask neutral layer for directed self-assembly (DSA) patterning // *Proc. of SPIE8680*, 2013. P. 86801-1-86801-9.
- Gronheid R., Doise J., Bekaert J. [et al.]** Implementation of templated DSA for via layer patterning at the 7 nm node // *Proc. of SPIE*, 9423, 2015. P. 942305-1-942305-10.
- Matsumiya T., Kurosava T., Yamano H. [et al.]** Material development for DSA hole graphoepitaxy process / *Conference Paper / 1<sup>st</sup> DSA symposium, At Leuven, Belgium*, 2015.
- Tiron R., Gharby A., Patricia P.B.** Template affinity role in CH shrink by DSA planarization // *Proc. of SPIE9423*, 2015. C. 942317-1-942317-11.
- Hishiro Y., Naruoka T., Anno Y. [et al.]** Applications of DSA for lithography // *19th Annual SOKUDO Lithography Breakfast Forum*, 2012.
- Ren Y., Lodge T.P., Hillmyer M.A.** Synthesis, Characterization, and Interaction Strengths of Difluorocarbene-Modified Polystyrene-Polyisoprene Block Copolymers // *Macromolecules* 33(3), 2000. P. 866-876.
- Kim S., Nealey P.F., Bates F.S.** Directed Assembly of Lamellae Forming Block Copolymer Thin Films near the Order-Disorder Transition // *Nano Lett.* 1(1), 2012. P. 11-14.
- Son J.G., Gotrik K.W., Ross, C.A.** High-Aspect-Ratio Perpendicular Orientation of PS-*b*-PDMS Thin Films under Solvent Annealing // *ACS Macro Lett.*, 1(11), 2012. P. 1279-1284.
- Shamsudin S.A.B., Sakaguchi G., Takenaka M., Hasegawa H.** Influence of Temperature and Type of Solvents on the Microdomain Orientation of PS-*b*-P2VP Ultrathin Films by Solvent Annealing // *Macromol. Symp.*, 327(1), 2013. P. 72-29.

24. **Cushen J.D., Bates C.M., Rausch E.M. [et al.]** Thin Film Self-Assembly of Poly(trimethylsilylstyrene-*b*-D, L-lactide) with Sub-10 nm Domains // *Macromolecules* 45(21), 2012. P. 8722-8728.
25. **Zhang J., Wu J., Li M. [et al.]** New Materials for Directed Self-Assembly for Advanced Patterning // *Proceeding SPIE9051*, (2014). P. 905111-1-905111-10.
26. **Chan B.T., Pathangi H., Gronheid R. [et al.]** Improved cost-effectiveness of the block co-polymer anneal process for DSA // *Proc. of SPIE*. Vol. 9777. P. 97771Z-1-97771Z-5.
27. **Chan B.T., Pathangi H., Gronheid R. [et al.]** Challenges for Line Width / Line Edge Roughness (LER/LWR) in Directed self-assembly advanced patterning / Conference Paper / 1<sup>st</sup> DSA symposium, At Leuven, Belgium, 2015.
28. **Tedesco S., Tiron R., Pain L.** IDEAL program: DSA activity at LETI / SOKUDO Breakfast, 2012.
29. **Pain L., Tiron R., Lattard L. [et al.]** Lithography alternatives: Why are they essential / *SOLID STATE TECHNOLOGY*, 2015. PP. 14-18.
30. **Fleury G., Aissou K., Tiron R. [et al.]** Development and integration of Si-containing block copolymers with enhanced resolutions for line space application / Conference Paper / 1<sup>st</sup> DSA symposium, At Leuven, Belgium, 2015.
31. **Hirahara E., Paunescu M., Polishchuk O. [et al.]** Maximize the benefits of DSA based on PS-PMMA block copolymer for high resolution patterning with novel BCP system / Conference Paper / 1<sup>st</sup> DSA symposium, At Leuven, Belgium, 2015.
32. **Chen X., Seo T., Rincon-Delgadillo P. [et al.]** Directed Self-assembly of PS-*b*-PMMA with Ionic Liquid Addition / Conference Paper / 1<sup>st</sup> DSA symposium, At Leuven, Belgium, 2015.
33. **Красников Г.Я., Гушин О.П., Морозов А.Д. [и др.]** Использование CAR-резистов в электронно-лучевой литографии // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*. 2015. № 1 (157). С. 41-48.
34. **Вишневецкий Д.В.** Мультиблок-сополимеры: синтез в условиях полимеризации с обратимой передачей цепи и свойства. - Дисс. на соиск. уч. ст. канд. хим. наук. - М., 2015.
35. **Борисова О.В.** Синтез и самоорганизация амфифильных блокградиентных сополимеров стирола и акриловой кислоты. - Дисс. на соиск. уч. ст. канд. хим. наук. - М., 2013.

# МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕДЬ-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

► Ф.И. Высикайло<sup>1</sup>, В.С. Митин<sup>2</sup>, А.Ю. Яковлев<sup>1</sup>, В.В. Беляев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО «МРТИ РАН», <sup>2</sup>ОАО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара», <sup>3</sup>МГОУ, РУДН

Исследованы композиционные покрытия из невзаимодействующих между собой металлургическим путем меди и углерода. Покрытия получали методом высокоскоростного ионно-плазменного магнетронного распыления (ВИПМР) с использованием составных мозаичных мишеней (ММ). Экспериментально показано, что метод ВИПМР позволяет эффективно распылять с одинаковой установившейся скоростью такие разнородные материалы, как медь и углерод в заранее заданной пропорции. При этом формируется поток атомов меди и углерода, гомогенно смешанных между собой на атомарном уровне. Поток меди и углерода осаждается на подложке в виде двухкомпонентного композиционного покрытия заданного состава на макроуровне. Установлено, что на поверхности подложки формируется покрытие, состоящее из медной и углеродной фаз наноразмерного диапазона типа ядро-оболочка. Кристаллическая дисперсность покрытия изменяется в зависимости от содержания в композите углерода. В зависимости от процентного содержания меди и углерода на подложке происходит формирование различных наночастиц и соответствующее наноструктурирование композита. Исследование фазового и элементного состава, микроструктуры, топографии поверхности, микротвердости, коэффициента трения и других характеристик получаемых наноструктурированных покрытий показывает, что медь и углерод в процессе осаждения на подложку, нагретую до 350–450 °С, на наноуровне взаимно не смешиваются и химически не взаимодействуют, но процентное содержание нанокристаллитов в композите существенно влияют на свойства композита. Концентрация углерода оказывает существенное влияние на шероховатость поверхности, адгезию, механические, электрические и трибологические свойства. Так при содержании 10–15 ат. % углерода наблюдается снижение коэффициента сухого трения покрытия до 0,1, а износостойкость  $< 10^{-17} \text{ м}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ . Полученные экспериментально результаты качественно объясняются захватом свободных электронов наноструктурами углерода и формированием слоев объемного заряда.

## COOPER-CARBON NANOSTRUCTURED COMPOSITE COATINGS WITH CONTROLLED STRUCTURE

P.I. Vysikaylo<sup>1</sup>, V.S. Mitin<sup>2</sup>, A.Yu. Yakovlev<sup>1</sup>, V.V. Belyaev<sup>3, 4</sup>

<sup>1</sup>MRTI RAS JSC, <sup>2</sup>VNIINM im. A.A. Bochvara, <sup>3</sup>MRSU RUDN

Studied Cu-C-composite. Coatings were produced by high ion plasma magnetron sputtering (HIPMS) using a composite mosaic target. It is shown experimentally that the HIPMS method can effectively spraying with the same steady rate of such diverse materials as copper and carbon in predetermined proportions. In this case, is formed by the flow of copper and carbon, is homogeneously mixed with each other at the atomic level. The flow of copper and carbon is deposited on the substrate in the form of two-component composite coating of given composition at the macro level. Studies have shown that at the nanoscale on the substrate is formed nanophases and related nanostructuring of the composite. The phase and elemental composition, microstructure, surface topography, microhardness, friction coefficient and other characteristics of the nanostructured coating shows that the copper and carbon in the process of deposition on a substrate heated to 350–450 °C, at the nanoscale are not mutually mixed and not chemically interact. On the surface of the substrate coating is formed, consisting of copper and carbon nano-size range of phases. The crystal dispersion coating varies depending on the content of carbon in the composite. The carbon concentration has a significant influence on surface roughness, adhesion and mechanical, electrical and tribological properties. So if they contain 10–15% (at.) carbon is observed decline in the dry-friction coating to 0,1–0,15. The mechanical properties can be explained by free electrons capture with carbon nanostructures and space charge formation.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходят коренные изменения в сфере новых технологий. Связано это с тем, что наступает эра создания и применения новых материалов, свойства которых определяются структурными элементами наноразмерного диапазона (порядка 100 нм). Здесь наиболее важные особенности характеристик наносистем обусловлены не конкретным уменьшением частиц, элементов или структур, а принципиально новыми качественными явлениями, присущими наномасштабу, когда проявляется влияние на макроскопические параметры получаемых продуктов *закономерностей квантовой механики, электрических полей и размерных поверхностных эффектов*. Считается, что к нанотехнологиям относятся технологии, в которых конструирование материалов определяется характерными размерами композитов от 1 до 100 нм. Действительно, характерный квантовый размер свободного электрона при комнатной температуре или его длина волны де Бройля равна  $l_e = 12,25[\text{Å}]/\sqrt{\varepsilon} \approx 7,6$  нм. Здесь  $\varepsilon$  – кинетическая энергия электрона в эВ. В средах влияние возмущения с характерным размером  $-l$  (или  $l_e = 7,6$  нм) оказывает существенное влияние на размерах в несколько раз больших, порядка  $10 \cdot l$  (или 76 нм). Следовательно, нанотехнологии это – технологии, используемые в комфортных для человека условиях

(при комнатной температуре), в которых основным элементом конструирования композитных материалов может оказаться поляризационный захват одного или нескольких свободных электронов [1]. Электрон обладает отрицательным зарядом. Кулоновские потенциалы, модифицирующие свойства нанообъектов, возникают в результате формирования и модификации двойных слоев объемного заряда в нейтральных наноструктурах [1] (рис. 1). Кулоновские силы являются все определяющими на уровне наноразмеров и являются дальнедействующими. Поэтому формирование нанокластеров или наноструктур, способных захватывать электроны с резонансной энергией (ловушек для свободных электронов) может существенно модифицировать макросвойства нанокомпозитов. Это явление обусловлено нарушением нейтральности на наноразмерах (рис. 1). Даже в этих явлениях квантовый характер нанотехнологических процессов в корне меняет способы создания материалов и устройств. Открываются неограниченные возможности по *синтезу наноразмерных структур* и, что самое главное, *самосборки* их в микро- и макроструктуры с уникальными свойствами и функциями. Это поистине революционный шаг, приводящий к радикальным изменениям в технологии производства новых материалов для различных отраслей промышлен-

ности. Углеродные структуры обладают большим сродством к электрону, а полые структуры типа фуллеренов, нанотрубок и иных замкнутых структур, ограниченных плоскостями графена, могут осуществлять захват резонансных электронов и тем модифицировать свойства нанокompозитов, содержащих наноструктурированный углерод (рис. 1).

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

Среди материалов, представляющих значительный интерес особенно в плане улучшения контактных условий работы деталей (снижение трения, повышение износостойкости), относятся композиты на основе металл – углерод. Нанесение этих материалов, особенно в случае слабого взаимодействия металла с углеродом (Cu, Ni, Co, Ag, Au, Pt, Ir, Pb, Sn и др.) требует использования специальных приемов и методов. Одним из таких методов является высокоскоростное ионно-плазменное

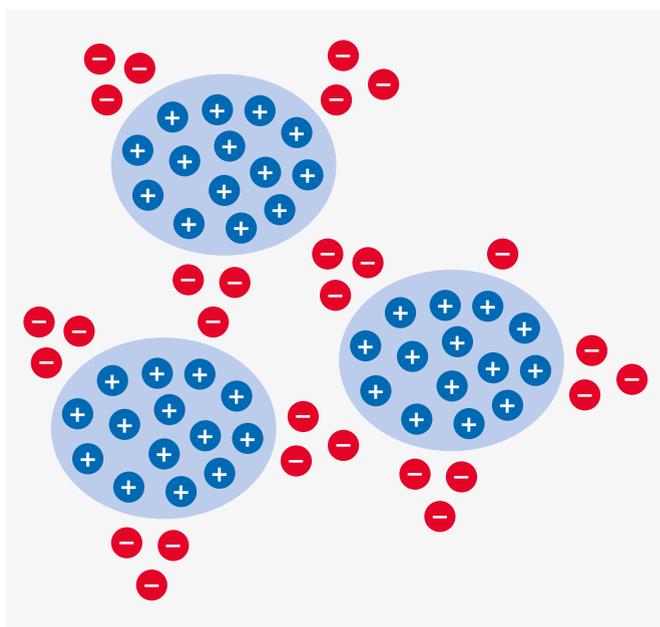


Рис. 1. Предполагаемая структуризация объемного заряда, обусловленная свойствами меди и углерода в их нанокompозите

магнетронное распыление (ВИПMP), относящееся к группе методов PVD (Physic Vacuum Deposition) [2, 3]. Сегодня – это один из универсальных методов получения многокомпонентных материалов в виде покрытий толщиной от 0,001 до 100–150 мкм. В настоящей работе представлены результаты получения композиционного покрытия из двух компонентов, представляющих химические элементы медь и углерод. Медь и углерод химически почти не взаимодействуют в металлургических процессах, то есть не образуют молекул. Эти элементы имеют большую разницу в температурах плавления ( $T_{пл}$  меди – 1083 °С,  $T_{пл}$  углерода  $\approx$  4000 °С) и в коэффициентах распыления в плазменном разряде: коэффициент распыления меди 2,3; углерода  $\approx$  0,2 при потенциале распыления  $\approx$  600 эВ. Однако композиты на базе этих элементов (медь и углерод) представляют большой интерес для науки и техники как конструкционные материалы. Оба эти материала широко используются в электротехнике, а также в качестве твердых смазок для пар трения и быстрходных подшипников в авиации и других отраслях машиностроения.

Результаты получения композиционных покрытий на основе металл – углерод методом ВИПMP и их свойства были опубликованы в работе [2]. Было показано, что совместное распыление разнородных (отличающихся по коэффициентам распыления в плазме) элементов из одной мишени позволяет осуществлять:

- на стадии генерации атомарного потока – равноскоростное распыление металла и углерода;
- на стадии формирования атомарного потока – гомогенное перемешивание атомов меди и углерода;
- на стадии перед осаждением – получение пересыщенного потока пара, образование псевдожидкости (кластеров) и нанокристаллов;
- на стадии формирования покрытия – рост нанокристаллитов и разделение на фазы меди и углерода.

Широкие технологические возможности этой схемы были опробованы в настоящей работе на паре медь – углерод. Нами исследовался широкий диапазон концентраций: по меди – от 86 до 7 ат. % и по углероду – от 14 до 93 ат. %. В данной работе исследовались фазовый и элементный состав покрытий при различном содержании углерода; морфология и шероховатость поверхности; микроструктура; твердость; трибологические свойства и тип углеродных связей в зависимости от соотношения углерода и металла; удельное электрическое сопротивление; проведен анализ полученных результатов в сопоставлении с результатами других исследований.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для нанесения композитной пленки медь – углерод использовалась высокопроизводительная промышленная установка ВУ-ВСМ 600/4 (МЭШ-60) [2–3].

В рабочей камере вакуумной установки был смонтирован напылительный модуль, состоящий из высокоскоростного ионно-плазменного магнетронного распылителя мощностью до 10 кВт с мишенью  $\varnothing 98$  мм; ионного источника с холодным катодом мощностью до 1,5 кВт и током ионного пучка до 800 мА; термического нагревателя мощностью до 15 кВт и максимальной температурой нагрева до  $750 \pm 20$  °С; подложкодержателя площадью до 2,0 дм<sup>2</sup> [2, 3]. Напылительный модуль по своим техническим характеристикам позволяет распылять мишени, в том числе мозаичные (составные) с эффективной площадью распыления 22 см<sup>2</sup> при удельной плотности мощности плазменного разряда от 15 Вт/см<sup>2</sup> до 100–180 Вт/см<sup>2</sup> (ток разряда 1–5 А); предварительно производить очистку и активацию поверхности напыляемых подложек ионной бомбардировкой и нагревать их до температуры  $350 \pm 50$  °С.

Для нанесения композиционного покрытия медь – углерод в качестве исходного материала использовали мозаичные мишени специальной конструкции. Конструкция мозаичной мишени обеспечивает эффективное охлаждение ее распыляемой части в зоне максимальной концентрации плазмы при токе до 10 А (удельная плотность тока плазменного разряда до 450 мА/см<sup>2</sup>) и мощности до 7 кВт (удельная плотность мощности плазменного разряда до 350 Вт/см<sup>2</sup>). Для обеспечения этого режима медная матрица и штифты из графита припаивались оловом или припоем ПОС-60 через специальные переходные слои покрытий к медной герметизирующей мембране. Для напыления композитного покрытия была изготовлена серия мишеней. Распыление мишеней производили на высокоскоростном режиме при плотности мощности разряда  $> 40$  Вт/см<sup>2</sup> (плотность тока  $> 100$  мА/см<sup>2</sup>). Композиционные покрытия медь – углерод наносили на различные типы подложек и образцов: нержавеющая сталь марки 18–10 – пластины, шайбы с полированной ( $R_a \approx 18–20$  нм) и шлифованной ( $R_a \approx 500–800$  нм) поверхностью; медь М1 – пластины; керамика из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – пластины; кварцевое боросиликатное стекло – пластины; кремний монокристаллический – пластины. Проводили тестирование покрытий: толщины, адгезии, коэффициента трения, износостойкости и электрического сопротивления. Толщину слоя покрытия определяли по методике

«Шар-кратер» [4]. Диапазон толщины слоев, наносимых на образцы для различных видов исследований, выбирался от 1,5 до 45 мкм.

### 2.1. Методика рентгеноструктурных исследований

Фазовый состав получаемых покрытий анализировали на рентгеновском дифрактометре Rigaku D/max-RC и ДРОН-3М, оснащенный источником излучения мощностью 12 кВт с вращающимся анодом (графитный кристалл – анализатор, CuK<sub>α</sub>-излучение и CoK<sub>α</sub>-излучение). На ДРОН-3М использовали излучение CuK<sub>β</sub>, дающее при съемках на малых углах синглет. Для съемки дифрактограмм использовали классическую схему фокусировки по Брэггу-Брентано. В качестве образцов для съемки использовали пластины 15×20×1,5 мм из кремния, нержавеющей стали и меди марки М1 с покрытием толщиной от 1,5 до 20 мкм. Ввиду необходимости получить высококачественную съемку для последующего структурного анализа, эксперимент проводили при мощности источника, близкой к максимальной (напряжение 55 кВ, ток 180 мА). Для обеспечения большей точности определяемых параметров съемку вели в интервале углов 2θ от 10 до 142° в режиме шагового сканирования с шагом 0,02°. Для получения кривых тета-сканирования счетчик устанавливался в положения, соответствующие максимумам в шкале 2Q пиков направлений <111>, <110> и <100>, после чего сканирование проводили в интервале –2,5 до 2,5° по оси θ относительно положения максимума. Уточнение параметров решетки, микроструктуры и параметров сферических гармоник проводили в программном пакете MAUD. Учет инструментального уширения выполнялся методом внешнего стандарта с использованием материала сравнения LaB<sub>6</sub> (NIST SRM 660a).

### 2.2. Методика исследования структурного состояния углерода в композите с использованием колебательной рамановской спектроскопии (КРС)

Все аллотропные формы углерода имеют свои характерные спектроскопические особенности как в плане излучения, так и в плане поглощения электромагнитных волн в видимом и инфракрасном диапазонах. По отношению величин различных пиков можно судить не только о наличии тех или иных аллотропных форм углерода, но и об их геометрических размерах, относительной концентрации и т. д.

Сегодня методом КРС хорошо исследованы спектры алмаза и графита. В спектрах КРС алмаза присутствует сильная линия в области  $1332\text{ см}^{-1}$  ( $T_2g$ ) – собственная линия алмаза. Для монокристаллического графита характерна линия в области  $1575\text{ см}^{-1}$ , связанная с колебаниями атомов углерода ( $E_{2g}$ ) в шестичленных циклах в плоскости графита, так называемая G-линия. Различная ориентация образца по отношению к падающему лучу не изменяет спектр. При структурных нарушениях кристаллической решетки графита начинает появляться линия ( $A_{1g}$ ) в области  $1355\text{ см}^{-1}$  – D-линия, запрещенная по правилам отбора в бездефектном кристалле графита. Наличие D-линии характерно для поликристаллического графита, всех видов аморфного графита и нанокристаллических графитовых пленок. КРС позволяет не только идентифицировать вещества, но и в ряде случаев определять другие их свойства. Так, соотношение интенсивности линий D и G ( $I_{D_1}/I_{G_1}$ ) в спектрах пленок углеродных материалов может быть использовано для анализа термической стабильности. Интенсивность D-пика может возрастать после отжига при температуре выше  $300\text{ °C}$  или после длительного испытания трением. Это явление в основном связывают с превращением  $sp^3$  связей в  $sp^2$ , десорбцией водорода и появлением нанокристаллического графита. По соотношению пиков D и G ( $I_{D_1}/I_{G_1}$ ) можно судить и о плоскостном размере микрокристаллов  $L_a$ . Эти соотношения используют для определения различных свойств наноматериалов: степени беспорядка в аморфном углероде; размеров нанокристаллов в нанографите и размеров доменов в пленках стеклоуглерода.

Развитие лазерной техники привело к тому, что наряду с использованием лазеров, излучающих в ИК и видимом диапазоне, появились устройства, позволяющие получать спектры КРС при возбуждении в ультрафиолетовом диапазоне (УФ). Исследование рамановского спектра проводили на образцах-пластинах из нержавеющей стали, меди и керамики. Размер пластин  $15 \times 20 \times 1,5\text{ мм}$ . Спектры КРС регистрировались на установке с микроскопической приставкой на базе спектрометра TRIAX 550 (Jobin Yvon) LDD Spec-10, 2KBUV (2048×512) (Princeton Instruments) с системой отрезающих фильтров для подавления возбуждающих лазерных линий. Источником возбуждающего света служили лазеры STABILITE2017 (Spectra).

Спектральный диапазон.....200–1100 нм  
Спектральное разрешение..... $1\text{ см}^{-1}$   
Длина волны лазера,  
возбуждающего КРС .... 257, 458, 514, 568, 647 нм  
Пространственное разрешение ..... 1–2 мкм

### 2.3. Методика исследования элементного состава и микроструктуры покрытия

Химический (элементный) состав покрытия, структуру поверхности покрытия и структуру в изломе покрытия исследовали при помощи полевого эмиссионного растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO 1430 с приставкой для энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) SAPHIRE фирмы Cambridge Instruments Ltd (Англия). Для этих исследований использовали образцы в виде пластин  $10 \times 15 \times 1,5\text{ мм}$  из нержавеющей стали, меди, керамики. Излом покрытия на образцах готовили путем изгиба металлических пластин или раскалывания керамической подложки. Локальная структура (топография) поверхности и класс ее шероховатости исследовались с помощью атомно-силового микроскопа STM/АСМ СММ 2000ТАМОК. При этом использовали платиновый зонд с размером острия менее  $50\text{ нм}$  и кремниевый стандартный кантилевер с радиусом закругления менее  $10\text{ нм}$ . Для исследований готовили пробы (образцы) – пластинки  $5 \times 5 \times 1,5\text{ мм}$  из нержавеющей стали с полированной поверхностью. Исследование тонкой структуры композита *медь – углерод* проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) типа JEM-2000 FX11 (JEOL) при ускоряющем напряжении  $160\text{ кВ}$  на просвет в трансмиссионном режиме (ТЕМ).

Объекты для электронно-микроскопического исследования готовили путем растворения в теплой дистиллированной воде подложки из соли, на которую был нанесен тонкий слой меди (около  $200\text{ нм}$  толщиной) и композита *медь – углерод* с содержанием углерода от  $14$  до  $93\text{ ат.}\%$ . Затем кусочки пленки извлекали на медную или золотую сеточку. Полученный препарат помещали в держатель электронного микроскопа и исследовали на просвет в режимах изображения и электронной дифракции с выделенной области при разных размерах селекторной диафрагмы с целью получения электронограмм от разных областей.

### 2.4. Методика исследования механических и электрических свойств

Исследование механических свойств получаемых покрытий проводили по методикам и на приборах, перечисленных ниже.

- Адгезию покрытия к подложке (качественную оценку) проводили по методике глубокого вдавливания индентера (алмазная пира-

мидка) на твердомере Виккерса типа HVS-50 при нагрузке на индентер 5–8 кг (50–80 Н) и склерометрическим методом (скрайбирование или царапанье) на приборе Scratch Testing ST-300 фирмы Teer Co Ltd, UK при нагрузках в диапазоне 0,1–20 кг (1–200 Н). Тип образцов для этих измерений – плоские шайбы  $\phi 15$ –20 мм и толщиной до 5 мм и пластины  $15 \times 20 \times 1,5$  мм из нержавеющей стали с шлифованной поверхностью (типа металлографического шлифа).

- Микротвердость покрытия исследовали металлографическим методом. Для измерений использовали микротвердомер типа HVS-1000, диапазон измерений 5–2500 Н<sub>V</sub>, испытательное усилие на индентер 0,05–0,1 Н. Образцы для измерений микротвердости аналогичны образцам для измерения адгезии.
- Износостойкость и трибологические характеристики композиционного покрытия определяли с помощью специализированного прибора – триботестера типа PIN ON DISC TESTER марки TEER-POD-2, фирмы Teer Co Ltd (Англия) по методике обкатывания в условиях сухого трения вращающейся поверхности (плоскость, диск) жестко зафиксированным пальцем со сферической контактной поверхностью или шариком из твердого сплава, быстрорежущей или шарикоподшипниковой стали. Для этих целей использовали образцы в виде плоских шайб  $\phi 20$ –30 мм из нержавеющей стали, на поверхность которых было нанесено покрытие. В качестве контртела использовались шарики  $\phi 5$  мм из твердого сплава ВК-8 и шарикоподшипниковой стали ШХ-15. Скорость движения столика с образцом составляла 4 мм/с, нагрузка на индентер варьировалась в диапазоне 0,5–10 кг (5–100 Н). Определяли коэффициент трения и степень износа в зависимости от нагрузки. Состояние поверхности износа пластины и шарика исследовалось металлографическим путем по визуальным снимкам.

Электрическое сопротивление пленок измеряли четырехточечным методом на приборе Jandel, модели RM3-AR Test Unit, снабженном устройством Multi Height Microposition Probe (позиционирование по оси X–Y). Для этих целей покрытие наносили на полированную поверхность пластин из керамики и кварцевого боросиликатного стекла. Значения электрического сопротивления фиксировались прямыми показаниями (Ом/см<sup>2</sup>). Затем они пересчитывались в значения удельного электрического микросопротивления (мкОм·см).

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены экспериментальные результаты по выбору режима равнораспределенного распыления композита медь – графит, режимы 3, 4, 5.

Согласно табл. 1 п. 3–4 воспроизведение заданного состава достигается уже при плотности мощности разряда  $> 40$  Вт/см<sup>2</sup>. Таким образом, при высокоскоростном ионно-плазменном магнетронном распылении разнородных материалов из одной мишени темп распыления (скорость распыления) задает компонент с максимальным коэффициентом распыления. В данном случае – это медь. Если распылять мозаичную мишень в режиме обычного магнетронного распыления при плотности мощности разряда до 30 Вт/см<sup>2</sup>, то заданный состав не воспроизводится (табл. 1, п. 5). В этом случае и медь, и графит будут распыляться со скоростями, пропорциональными своим коэффициентам распыления (2,2 и 0,2 соответственно). Кроме того, распыление в обычном режиме существенно снижает общую скорость распыления компонентов и, соответственно, возрастают условия загрязнения конденсата остаточными газами и углеводородами. При малых скоростях  $< 0,1$  мкм/мин сложно обеспечить высокие механические свойства материала.

#### 3.1. Результаты рентгенографических исследований

Результаты анализа рентгеновских спектров композиционных покрытий представлены в табл. 1. Анализ не выявил дифракционных максимумов графитовой модификации углерода в полученных композитах, включая даже композит с содержанием углерода до 93 ат. %. Самостоятельные линии какой-либо фазы, показывающей либо взаимодействие меди с углеродом с образованием карбида, либо образование самостоятельного соединения углерода (кристаллическая фаза графита либо алмазоподобного углерода) отсутствуют. При этом химический анализ состава покрытия фиксирует (соответствующее режиму напыления и выбору мишени) содержание углерода от 14 до 93 ат. %. Сопоставление спектров композита и чистой меди показало, что введение углерода до 72 ат. % приводит вначале к незначительному уменьшению периода решетки меди и более значительному увеличению при концентрации углерода, равной 86 и 93 ат. %. При этом на дифрактограммах этих составов наблюдается и значительное уширение дифракционных максимумов (табл. 2).

Таблица 1. Режимы распыления мозаичной мишени Cu–C и состав покрытия

№	Режим распыления мишени			Режим осаждения покрытия		Состав и свойства покрытия			
	ток разряда	плотность тока	плотность мощности	скорость нанесения	температура подложки	концентрация элементов, ат. %		толщина слоя	шероховатость $R_a$
	А	мА/см <sup>2</sup>	Вт/см <sup>2</sup>	мкм/мин	°С	Cu	C	мкм	нм
Мишень из чистой меди									
1	4	182	91	1,5	350	100	–	45	19/25
Мишень из чистого графита МПГ-7									
2	2	91	46	0,05	350	–	100	1,5	19/25
Мишень Cu – 82%, C – 18%									
3	4	182	91	1,2	350	82	18	36	19/191
4	2	91	46	0,6	350	83	17	27	19/127
5	1	22	16	0,2	350	86	14	12	19/26
Мишень Cu – 65%, C – 35%									
6	4	182	91	0,4	350	65	35	16	19/60
Мишень Cu – 28%, C – 72%									
7	2	91	46	0,1	350	28	72	4,0	19/45
Мишень Cu – 14%, C – 86%									
8	2	91	46	0,08	350	14	86	4,8	19/29
Мишень Cu – 7%, C – 93%									
9	2	91	46	0,06	350	7	93	3,6	19/22

\* Значение  $R_a$  шероховатости поверхности покрытия дается относительно  $R_a$  шероховатости подложки ( $R_a = 19\text{--}20$  нм).

Анализ профилей основных дифракционных максимумов, соответствующих кристаллической решетке меди, для образцов с содержанием углерода до 35 ат. % ( $\approx 6,2$  вес. %) показал, что достаточно хорошее описание может быть получено в приближении двух компонентов: кристаллической составляющей с размером кристаллитов 100–150 нм и ультрадисперсной (рентгеноаморфной) с размером кристаллитов 30–40 нм.

В покрытиях с содержанием углерода >35 ат. % размер кристаллитов медной фазы уменьшается до 50 нм, а ультрадисперсной (рентгеноаморфной) до  $\approx 20$  нм. Согласно табл. 2, при концентрациях углерода >35 ат. % значения параметров решетки композитов существенно больше параметров решетки чистой меди. Это могло бы свидетельствовать об образовании псевдотвердого рас-

твор углерода в металле. Однако известно, что медь в твердом и жидком состояниях находится в равновесии с графитом (углеродом). Поэтому говорить о прямом растворении углерода в меди не приходится, и, по-видимому, здесь имеет место захват свободных электронов меди структурами углерода. Этот процесс происходит на последней стадии формирования покрытия на подложке.

Для более детального изучения поведения в композите углерода был проведен отжиг покрытий с содержанием углерода 18 ат. %, нанесенных на подложки из кремния и хромистой стали. Отжиг проводили в вакууме не ниже  $10^{-3}$  Па в течение 1 ч при температуре 650 °С. Эта температура на 100 °С выше температуры рекристаллизации меди и должна обеспечить подвижность атомов меди и рекристаллизацию с ростом кристаллов. Однако после отжига

Таблица 2. Рентгеноструктурные параметры композитов

№ образца	Состав покрытия	Материал подложки	Покрытие медь – углерод			
			Период решетки меди, нм	Размер кристаллических блоков по компонентам, нм	Средний размер кристаллических блоков, нм	Среднеквадратичная микродеформация, %
9	Чистая медь	Медь	0,36150	–	–	–
		Хр. сталь <sup>*</sup>	0,36143	>150/37	80	0,046
5	14	Хр. сталь	0,36142	100/40	45	0,060
		Кремний <sup>**</sup>	0,36150	–	–	–
4	17	Хр. сталь	0,36140	100/30	37	0,120
		Кремний	0,36150	–	–	–
3	18	Хр. сталь	0,36156	56/25	40	0,135
		Кремний	0,36150	–	–	–
27	35	Хр. сталь	0,36156	44/15	22	0,054
13	72	Хр. Сталь	0,36158	28/15	23	0,230
16	86	Хр. сталь	0,36178	20/9	19	0,250
18	93	Хр. Сталь	0,36420	20/9	10	0,210

\* Параметр решетки хромистой стали  $a=0,2872$  нм.

\*\* Параметр решетки монокристаллического кремния  $a=0,357$  нм.

существенных изменений в структурах композита не наблюдается. Это свидетельствует о прочных связях (возможно кулоновских) в композите, препятствующих диффузии атомов меди.

### 3.2. Результаты микроскопических исследований структуры

Характерное влияние углерода на формирование кристаллитов меди хорошо видно по изменению морфологии и шероховатости покрытия при исследовании покрытий на атомно-силовом микроскопе. Полученные результаты свидетельствуют о том, что вначале, при малых концентрациях углерода, шероховатость поверхности композиционного покрытия возрастает от значения  $R_a$ , равного 73 нм для чистой меди, до  $R_a = 191$  нм, достигая максимума при содержании в покрытии 18 ат. % С (табл. 2). Затем, по мере роста концентрации углерода шероховатость поверхности снижается до уровня  $R_a = 22$  нм при 93 ат. % С почти так же, как для покрытия из чистого графита (табл. 1, п. 2).

Здесь, с точки зрения формирования кристаллитов меди по характеру морфологии поверхно-

сти покрытия видно, что медь в чистом виде имеет сглаженный рельеф (рис. 2а) и характерную структуру направленного роста столбчатых кристаллов. При совместном осаждении меди и углерода кластеры углерода вытесняются на границы кристаллитов меди, препятствуя их росту. При этом происходит блокирование 2d-механизма роста и происходит рост кристаллитов вверх. С этим, по-видимому, и связано увеличение шероховатости поверхности и пластинчатая огранка кристаллитов на поверхности композиционного покрытия (рис. 2б). С ростом концентрации углерода «возбуждение» фронтальной кристаллизации меди по 3d-механизму затухает (рис. 2в). При концентрации углерода в композите, равном 72 ат. %, рельеф и огранка кристаллитов становится более гладкой с тенденцией к оваллизации вершин кристаллитов. А при содержании углерода до 93 ат. % рельеф становится гладким с мелкими кристаллитами с овальной поверхностью (рис. 2г). Эти результаты, с одной стороны, как бы подтверждают, что углерод находится на поверхности, но вместе с тем, несмотря на химическую инертность меди и углерода, формирование слоя

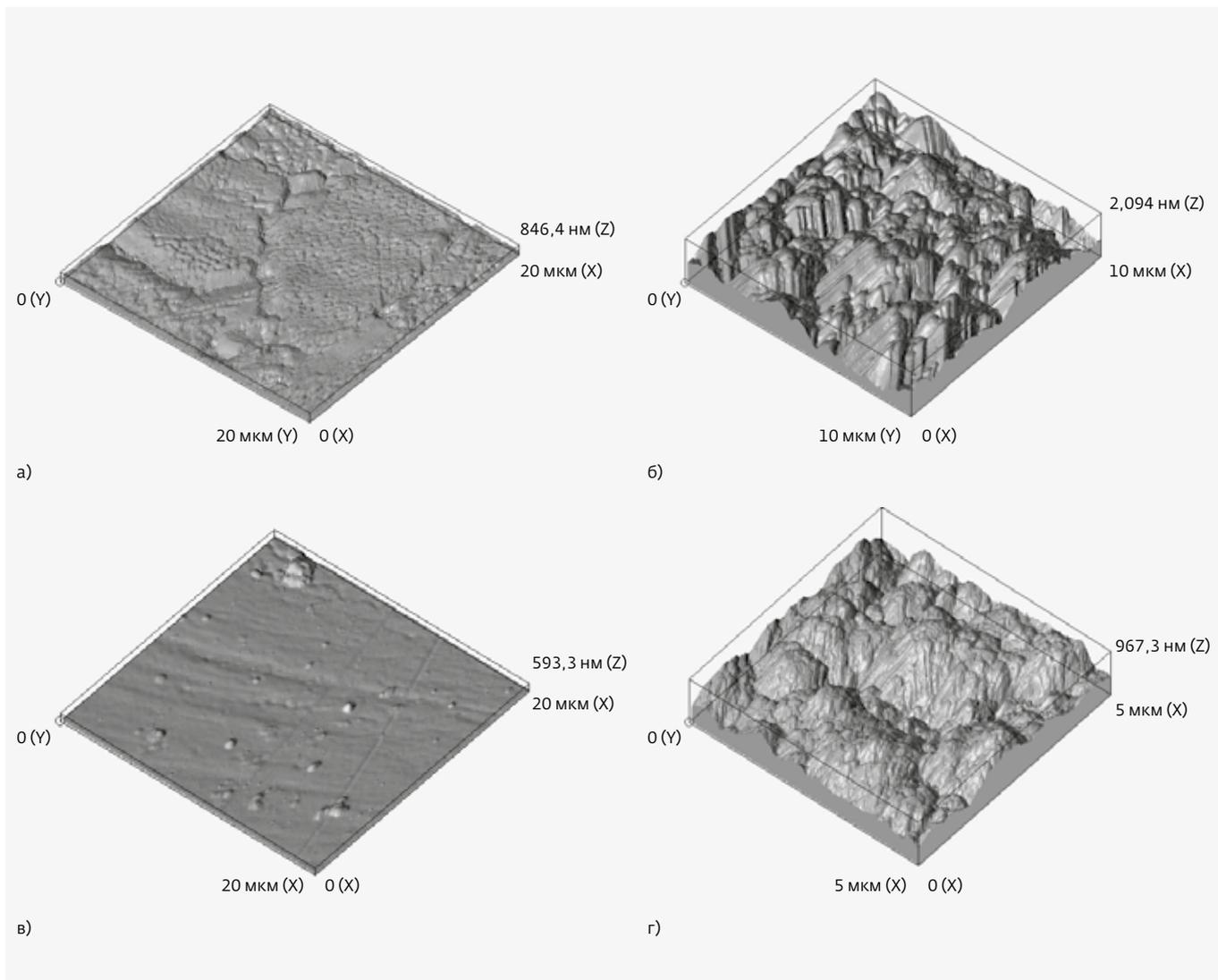
покрытия на подложке происходит не в виде разоб-  
щенных ультрадисперсных частичек этих элемен-  
тов, а в виде компактного, когезионно связанного  
композиционного материала, состоящего из рав-  
номерно распределенных в объеме кристаллитов  
меди и структур углерода.

### 3.3. Результаты комбинационной рамановской спектроскопии (КРС)

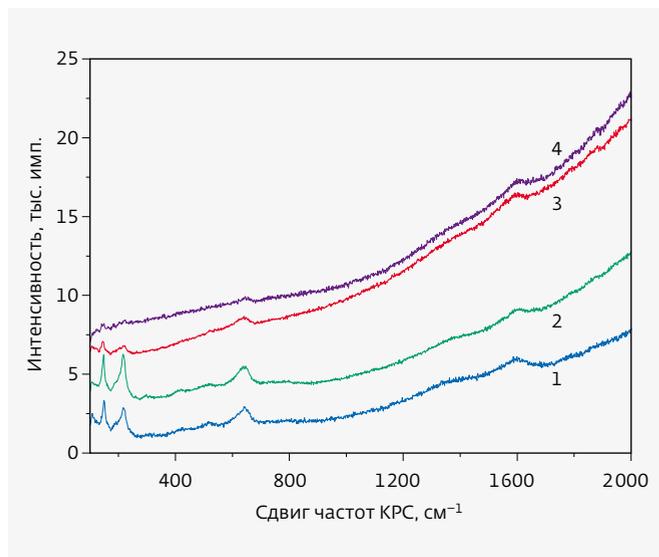
Аллотропные формы углерода, его структурное  
состояние на предмет характерных размеров кри-  
сталлитов и наличия  $sp^1$ -,  $sp^2$ -,  $sp^3$ -связей в нано-  
композите медь – углерод определяли с помощью  
комбинационного рассеяния (КР) и рамановской  
спектроскопии.

Спектры КР композитов (рис. 3) характеризуются  
широкими линиями в области  $1350$  и  $1580$   $cm^{-1}$ ,  
соответствующими аморфному графиту на силь-  
ной люминесцентной подставке. Соотношение  
линий в обл.  $1350$   $cm^{-1}$  (D-пик) и  $1580$   $cm^{-1}$  (G-пик),  
связанных с аморфным графитом, позволяет  
утверждать, что размеры кристаллитов углерода  
порядка  $5$  нм. Для всех исследованных спектров КР  
характерен сильный фон люминесцентного излу-  
чения от металлической фазы, который полностью  
экранирует излучение от возможных фаз алмазо-  
подобного углерода и других его соединений.

Линии в области  $108$ ,  $144$ ,  $215$  и  $650$   $cm^{-1}$  связаны  
с наличием  $Cu_2O$ . Процентное содержание  $Cu_2O$   
по мере приближения подложки к центру паро-



**Рис. 2.** Атомно-силовое изображение покрытий медь – углерод в зависимости от концентрации углерода в покрытии: а – чистая медь; б – ат. % углерода; в – ат. % углерода; г – ат. % углерода



**Рис. 3.** Спектры КРС образцов углерод медное напыление, 18% углерода: 1 – оскоб с медной подложки из периферийной зоны; 2 – напыление в холодной периферии парового потока при температуре подложки не более 100 °С; 3 – напыление в периферии парового потока при температуре подложки 350 °С; 4 – напыление в центре парового потока при 350 °С

вого потока резко уменьшается и в центре парового потока практически равен нулю (рис. 3).

### 3.4. Результаты электронно-микроскопических исследований

Результаты исследования элементного состава и структуры покрытия на РЭМ и тонкой структуры на ПЭМ (рис. 4) хорошо согласуются с данными рентгеновской дифрактометрии и атомно-силовой микроскопии.

При относительно небольшом содержании углерода до 14 ат. % (рис. 4(1)) поверхность покрытия гладкая, а на изломе в сечении проявляется типичная столбчатая структура, характерная для чистых металлов.

С увеличением содержания углерода до 17 ат. % и выше (рис. 4(2) и (3)) поверхность покрытия становится более развитой, а структура на изломе переходит из столбчатой в однородную мелкозернистую и разориентированную структуру. Вид структуры излома создает впечатление разрыхленного материала, состоящего из вязкой и хрупкой составляющих. На поверхности покрытия с содержанием углерода 18 ат. % присутствует слой с очень развитой поверхностью, состоящей из больших и малых глобулярных агрега-

тов. С увеличением содержания углерода структура в сечении становится ультрадисперсной (рис. 4(5) и (6)) характер излома более хрупкий, а поверхность более гладкая. Анализ элементного состава на поверхности покрытия и по площади сечения излома показывает равномерное однородное содержание элементов, что свидетельствует о высокой однородности двухкомпонентного материала как по составу, так и по структуре (высокая дисперсность меди и углерода). О высокой однородности состава и дисперсности элементов свидетельствуют и снимки тонкой структуры покрытия, сделанные на ПЭМ (рис. 5).

Структура всех образцов покрытия, включая чистую медь, характеризуется как материал с исключительно мелкими зёрнами, размер которых не превышает 100 нм. Размеры зёрен определяли методом секущей линии на микрофотографиях при 20–500-тысячекратном увеличении, снятых в светлом и темном полях. Электроннограммы с целью определения фазового состава и текстуры получали с использованием селективных диафрагм разного состава.

В чистой меди и при относительно небольшом содержании углерода до 14 ат. % средний размер зёрен составлял от 20 до 100 нм, при этом отмечалась структура роста (рис. 5а). С увеличением содержания углерода до 18 ат. % и выше средний размер зёрна уменьшается до 40 нм, и текстура роста практически исчезает. На рис. 5б слева показан общий план структуры. Видны зёрна (серый и темный фон) и границы зёрен в виде сетки белых линий. При этом можно сопоставить толщину этих границ с размером зёрен. Она составляет  $\approx 0,1-0,15$  от среднего размера зёрна. В структуре покрытия с содержанием углерода 72 ат. % размер зёрен меди уменьшается до 10–20 нм, а толщина границ между зёрнами остается на том же уровне и, соответственно, протяженность этих границ растет (рис. 5в), что косвенно можно связать с увеличением концентрации углерода.

При высоких концентрациях углерода практически полностью отсутствует текстура, а в микроразрешении исчезают дефекты упаковок или двойников (рис. 5б, в, слева). Для более четкой идентификации того, относятся ли эти зёрна полностью к медной фазе, а границы – к углеродной, необходимо дополнительное исследование структуры на ПЭМ при разрешении, меньшем 1,5 нм с рассмотрением характера расположения атомных плоскостей в этих областях (зёрно, граница).

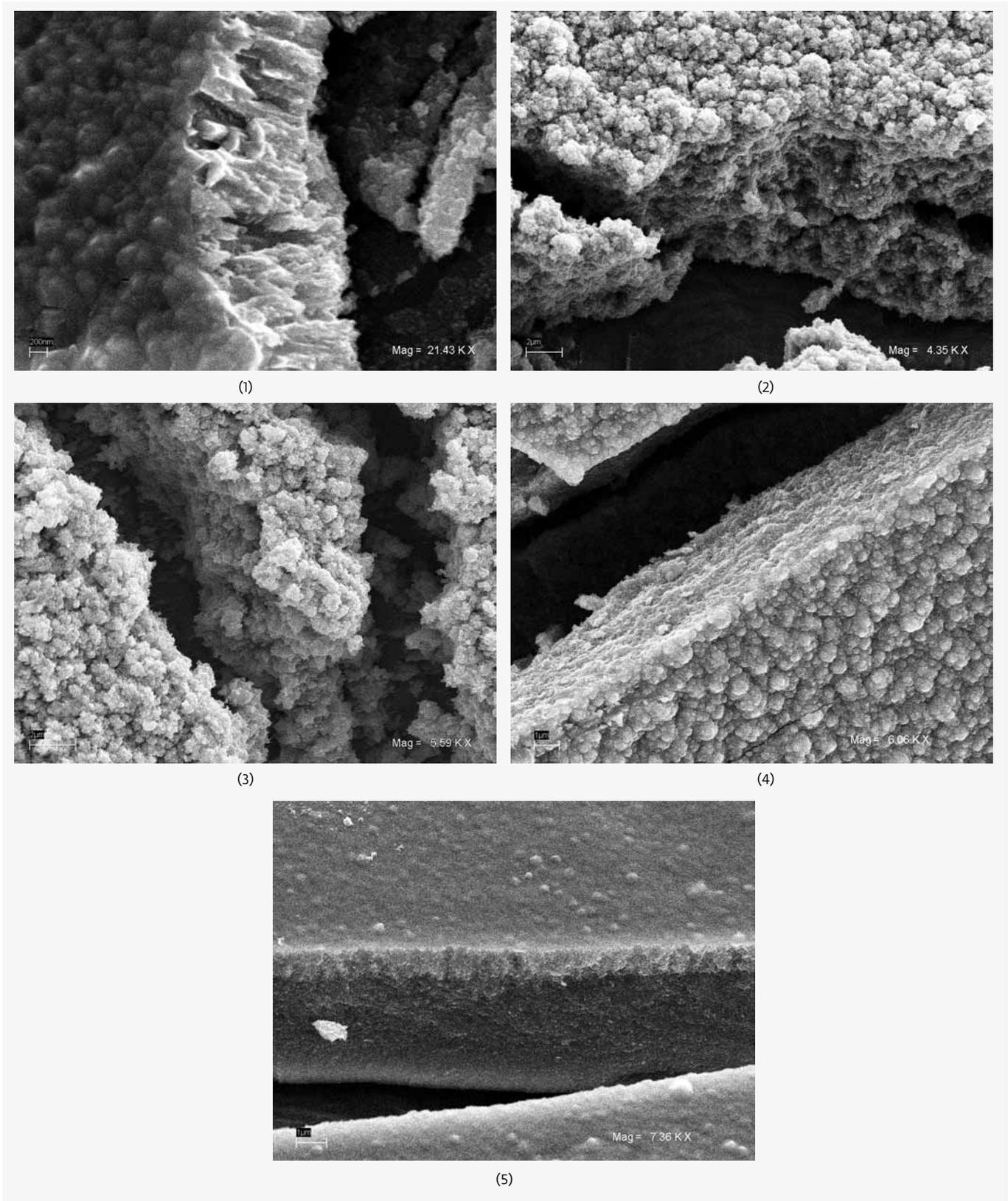
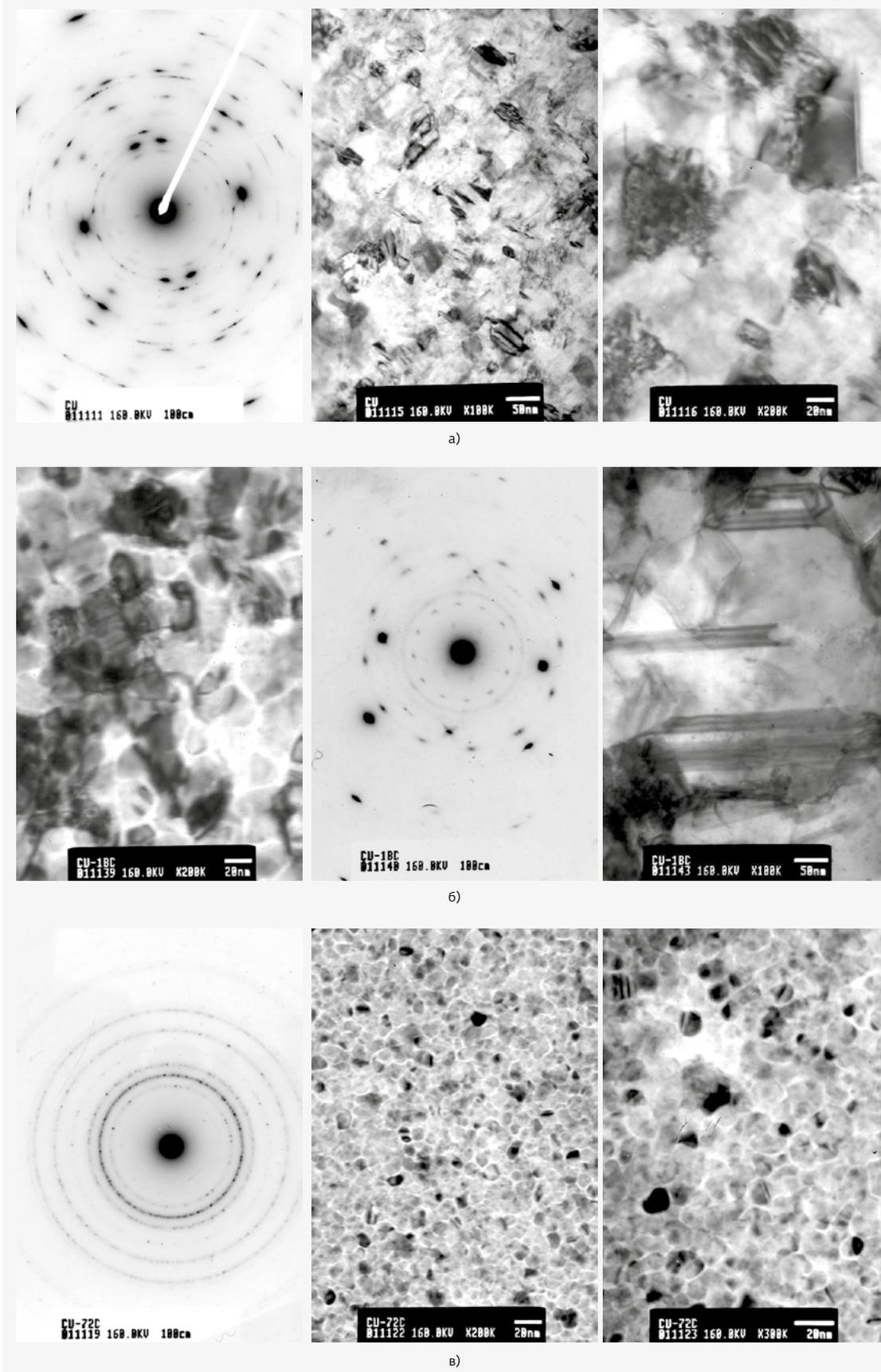


Рис. 4. Структура покрытия медь – углерод, РЭМ: 1 – 14 ат. % углерода; 2 – 17 ат. % углерода; 3 – 18 ат. % углерода; 4 – 72 ат. % углерода; 5 – 86 ат. % углерода



**Рис. 5.** Структура материала покрытия медь – углерод, ПЭМ: а – чистая медь, структура и электронограмма; б – 18 ат. % углерода, структура и электронограмма; в – 72 ат. % углерода, структура и электронограмма

### 3.5. Результаты исследования механических и трибологических свойств

При нанесении композиционного покрытия медь – углерод по режимам, приведенным в табл. 1, формируется покрытие в виде компактного плотного слоя, адгезионно связанного с поверхностью подложек как металлических, так и керамических, и стеклянных. Визуальный контроль адгезии и цвета покрытия на подложках из стекла с внутренней стороны показывает, что слой покрытия равномерно прилегает по всей поверхности. Цвет композита меняется от красного (для чистой меди) с постепенным переходом до бледно-красного с серым оттенком при увеличении концентрации углерода. Монотонное изменение цвета всего композита свидетельствует о высокой однородности материала покрытия. Цвет покрытия становится практически серо-стальным при содержании углерода 93 ат. %. На внешней стороне цвет покрытия меняется более резко – от ярко-красного (чистая медь) до темно-бурого (при 17 ат. % углерода), а при 18 ат. % углерода цвет покрытия становится бархатисто-черным; с ростом содержания углерода бархатистость постепенно исчезает, и покрытие при содержании углерода 72 ат. % и выше приобретает темно-серый цвет с глянцем. Эти изменения цвета, как было показано исследованиями поверхности покрытия на АСМ, связано не только с содержанием углерода в материале, но и с характером рельефа и его шероховатостью.

Механическое воздействие на такую поверхность при обкатке шариком с нагрузкой до 50 Н показывает, как в первую очередь деформируются выступающие вершины кристаллитов (рис. 6а и б). Харак-

тер деформации указывает на высокую пластичность композита.

При деформации, как на начальной стадии, так и в течение длительного времени (рис. 6б, в), в покрытии не образуется трещин и продуктов отслаивания в виде чешуек материала, что свидетельствует о высокой пластичности композита и высокой внутренней когезии. Микрорентгеноспектральный анализ состава материала поверхностного слоя, подвергнутого деформации, показывает, что на начальной стадии соотношение меди и углерода не меняется. Но затем, при более глубоком воздействии индентера, материал поверхностного слоя обогащается углеродом. Например, в композите с 18 ат. % углерода содержание углерода возрастает до 23–27 ат. %. При точечном воздействии на материал алмазным индентером (нагрузка 50 Н) происходит пластичная деформация композита, но без налипания и без характерного для пластичных материалов краевого наволакивания. На рис. 7 показан характер отпечатков от воздействия алмазного индентера на композиционное покрытие в сравнении с покрытием из чистой меди (рис. 7а). Измерение микротвердости показывает (табл. 3), что при содержании углерода от 14 до 35 ат. % (6,0 вес. %) материал композиционного покрытия остается пластичным и не уступает чистой меди. При такой высокой пластичности характер пластического течения материала композита и высокая его инертность к схватыванию с материалом контртела обусловлены присутствием в композите углерода и его структурой. Эти факторы в совокупности определяют механические (табл. 3), электрические (табл. 4) и, возможно, другие свойства, которые предстоит еще изучить. Исследования по трению и износу мате-

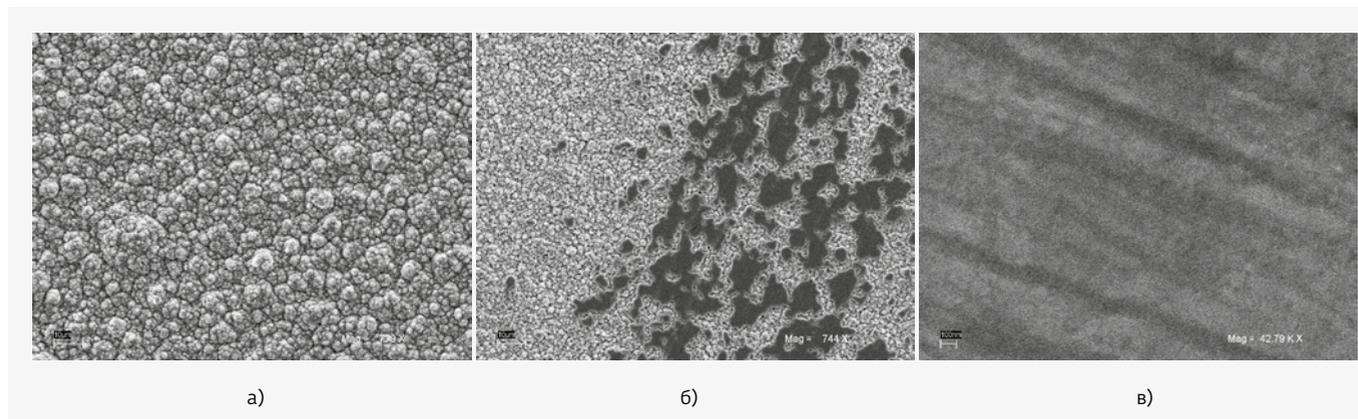
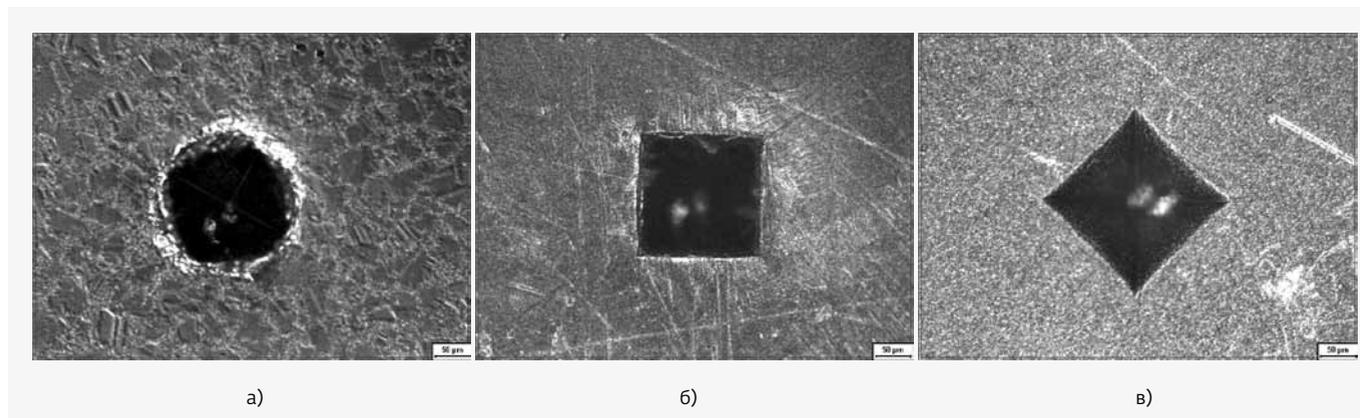


Рис. 6. Структура поверхности композиционного покрытия медь – углерод при различных видах механического воздействия: а – исходное состояние поверхности; б, в – обкатка стальным шариком при нагрузке 70 Н; б – начальная стадия; в – конечная стадия обкатки



**Рис. 7.** Структура поверхности композиционного покрытия *медь – углерод* при механическом воздействии алмазным индентером при нагрузке 50 Н: а – чистая медь, б – 14 ат. % углерода; в – 18 ат. % углерода

риала композита представлены в табл. 3, из которой видно, что комплексу высоких пластических свойств, износостойкости и адгезии отвечают композиционные покрытия медь – углерод с содержанием углерода в диапазоне концентраций от 18 до 35 ат.%. Покрытия с меньшим содержанием углерода будут приближаться к свойствам меди, а с большим – к свойствам чистого графита. Проведенные исследования трибологических характеристик (коэффициента трения и износа) показали (табл. 3), что композитное покрытие обладает низким коэффициентом сухого трения  $\approx 0,1$  и высокой износостойкостью  $< 10^{-17} \text{ м}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ .

### 3.6. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Удельное электрическое сопротивление композита (табл. 4) начинает резко приближаться к значению удельного электрического сопротивления графита при концентрации углерода выше 35 ат.%. При концентрации углерода 72 и 86 ат. % удельное электрическое сопротивление вырастает в пять раз в первом случае по сравнению с 35 ат.%, а во втором случае – на порядок превышает табличное значение удельного электрического сопротивления графита.

Отдельно следует рассматривать значение удельного электрического сопротивления для композита с содержанием углерода 93 ат.%. Оно превышает удельное электросопротивление графита МПГ-7 почти в восемь раз, а для покрытия из чистого графита, выполненного в данной установке, – в два раза. С чем связана эта аномалия роста удельного электрического сопротивления? По-видимому, прежде всего сильное влияние оказывает дисперсная структура и в том и в другом случае, а также наблюдается эффект введения в материал, обла-

дающий ярко выраженными акцепторными свойствами, небольшого количества материала донора. В связи с этим идет поглощение части электронов проводимости меди и частичная нейтрализация электронов проводимости углерода. Этим и объясняется, по-видимому, резкий скачок удельного электрического сопротивления после введения углерода  $> 35$  ат. %.

### 4. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов комплексного исследования фазового состава, структуры, механических и электрических свойств композита *медь – углерод* с содержанием углерода от 14 до 93 ат.%, получаемого магнетронным распылением из составной (мозаичной) мишени при высокоскоростном режиме и плотности мощности разряда  $> 40 \text{ Вт}/\text{см}^2$  показывает следующее.

1. Для получения композита *медь – углерод* можно использовать процесс простого обычного совместного распыления металла и графита без использования реакционных газов и различных приемов стимуляции атомов углерода, как выполнялось в [5, 6]. Эта схема не использовалась ни кем, кроме авторов данной работы в [2, 3]. Применение в работе этой схемы обеспечило на стадии генерации парового потока гомогенное перемешивание атомов меди и атомов углерода, последующую их самосборку в кластеры и совместное осаждение на подложку при температуре, близкой к температуре рекристаллизации меди. На основании исследований показано, что периферийная часть потока загрязняется кислородом и наносить покрытия следует в его центральной части.

2. В результате таких условий осаждения были получены слои композиционного материала толщи-

**Таблица 3.** Механические и трибологические свойства композиционного покрытия медь – углерод

№	Содержание углерода в покрытии, ат. %	Микротвердость покрытия $H_V$ , кг/мм <sup>2</sup> нагрузка 0,1 Н		Коэффициент трения $\mu$ РiN-on-DISC, индентер ВК-8 нагрузка >100 Н	Износостойкость, м <sup>3</sup> /Н·м	Адгезия	
		исх.	после отжига			скрэтч	укол, 5 кг
1	Медь чистая	127	123	0,36	$< 10^{-15}$	> 50	+
2	18	184	191	0,15	$< 10^{-17}$	> 60	+
3	28	200	195	0,10	$< 10^{-17}$	> 60	+
4	35	210	–	0,06	$< 10^{-17}$	> 60	+
5	72	230	–	0,25	$< 10^{-16}$	40	-/+
6	86	200	–	0,20	$< 10^{-15}$	30	–
7	93	300	–	0,15	$< 10^{-13}$	15	–
8	100	–	–	0,10	$< 10^{-13}$	10	–

ной от 3,6 до 36 мкм. В других работах [5, 6] толщина полученных слоев композиционного материала не превышала 560 нм. Покрытия, полученные в данной работе, относятся уже к классу наноструктурных покрытий, которые могут использоваться в машиностроении для модификации рабочих поверхностей с шероховатостью  $R_a$  от 0,5 до 3,5 мкм (шлифовка, обработка резцом).

3. Несмотря на необычный характер компонентов композита, которые не взаимодействуют друг с другом (с образованием молекул) и которые не удается эффективно смешать на атомном или хотя бы на ультрадисперсном уровне обычными приемами металлургии, полученные покрытия из этого композита находятся в компактном состоянии и имеют высокую адгезию к подложкам из различных материалов.

4. При механическом воздействии на материал композита он не рассыпается на отдельные фрагменты, а ведет себя как металл, механические, пластические и антифрикционные свойства которого значительно выше, чем у составляющих его компонентов – меди и углерода. Композитное покрытие обладает низким коэффициентом сухого трения  $\approx 0,1$  и высокой износостойкостью  $< 10^{-17}$  м<sup>3</sup>/Н·м.

4. При механическом воздействии на материал композита он не рассыпается на отдельные фрагменты, а ведет себя как металл, механические, пластические и антифрикционные свойства которого значительно выше, чем у составляющих его компонентов – меди и углерода. Композитное покрытие обладает низким коэффициентом сухого трения  $\approx 0,1$  и высокой износостойкостью  $< 10^{-17}$  м<sup>3</sup>/Н·м.

**Таблица 4.** Удельное электрическое сопротивление композиционного покрытия медь – углерод

№	Содержание в композите, ат. %		Толщина покрытия, мкм	Удельное электросопротивление, мкОм·см	Примечание
	Cu	C			
1	100	–	45	2,0	Табличное значение 1,78 мкОм·см
2	82	18	36	22,5	–
3	65	35	16	131,0	–
4	28	72	4,0	650,0	–
5	14	86	4,8	1 360,0	–
6	7	93	3,6	8 100,0	–
7	–	100	1,5	2 200,0	Табличное значение 1 040 мкОм·см

5. При концентрациях меди порядка 7% композит представляет собой материал с аномально высоким сопротивлением  $\rho \approx 8,1 \cdot 10^3$  мкОм·см, что существенно выше, чем у чистого графита ( $1,2 \cdot 10^3$  мкОм·см).

Природа этих и других аномальных свойств композитов связана, по-видимому, прежде всего со структурой композита, его фазовым и химическим составом, а также характером взаимодействия заряженных структурных элементов на базе меди и углерода (рис. 1). Полностью идентифицировать эти структурные элементы в работе нам не удалось, как и механизм связи кристаллитов меди и структур углерода.

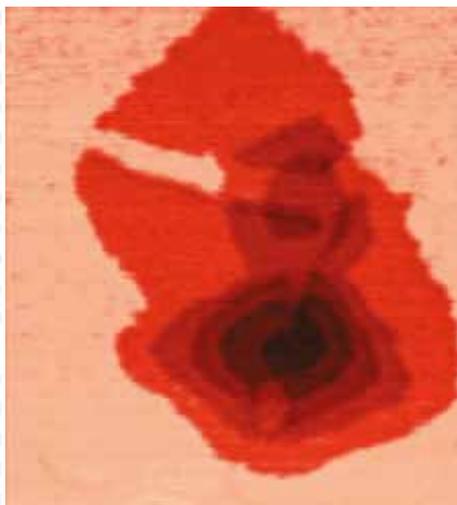
Представляет интерес более детальное исследование пластических свойств композита и влияния меди на электрическое сопротивление углерода. Изучение этих свойств важно для дальнейшего технологического применения конструкционных покрытий в машиностроении и электротехнике.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-07-00469 и 17-07-00945).*

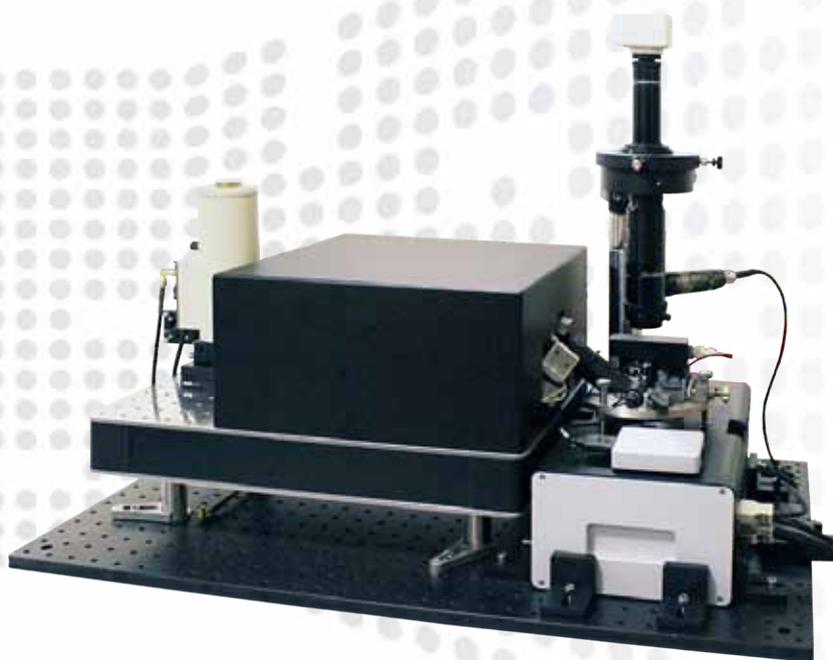
## ЛИТЕРАТУРА

1. **Высикайло Ф.И.** Поляризация аллотропных полых форм углерода и ее применение в конструировании нанокompозитов // Нанотехника. 2010. № 4 (24). С. XX.
2. **Ширяев С.А., Атаманов М.В., Гусева М.И., Мартыненко Ю.В. Митин А.В., Митин В.С., Московкин П.Г.** Получение и свойства композиционных покрытий на основе металл-углерод с нанокристаллической структурой // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 2. С. 99-104.
3. **Mitin V., Sharipov E., Mitin A.** High deposition rate magnetrons - innovative coating technology: key elements and advantages // Surface Engineering. 2006. Vol. 22. № 1. С. 1-6.
4. Проспект фирмы Teer Coatings Ltd, Web www. teercoatings.co.uk «Thin Film Coating TEST EQUIPMENT. TESTER BALL-CRATER THE BC-1». 2006.
5. **Углов В.В., Анищик В.М., Кулешов А.К и др.** Взаимосвязь микроструктурного состояния и механических свойств углеродных и металл-углеродных покрытий, формируемых плазмосиленным химическим вакуумным осаждением // Перспективные материалы. 2003. № 6. С. 5-11.
6. **Поло И., Тьери Ф., Пелетье Ж., Углов В. и др.** Структура и механические свойства наноструктурированных металл-углеродных покрытий, формируемых с помощью плазмохимического и вакуумно-дугового осаждения // Перспективные материалы. 2002. № 5. С. 13-19.

АСМ — ИК — СБОМ



Монослой олиготиофена на Si, 1.5x1.5 мкм



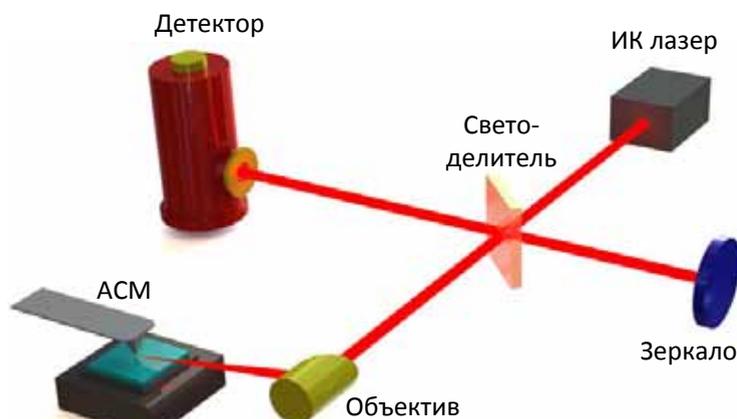
# ИНТЕГРА ИК

- ИК микроскопия и спектроскопия с 10 нм пространственным разрешением
- Широкий спектральный диапазон измерений: 3-12 мкм
- Низкий температурный дрейф и высокая стабильность системы
- Универсальный АСМ с самыми современными методиками: SRI (проводимость), KPFM (поверхностный потенциал), SCM (емкость), MFM (магнитные свойства), PFM (пьезоэлектрические свойства)
- Hybrid Mode™ – картирование количественных наномеханических характеристик и физических свойств за счет прямых силовых измерений
- Интеграция с микроРаманом (опционально)

НТ-МДТ Спектрум Инструментс представляет ИНТЕГРА ИК – рассеивающий сканирующий ближнепольный оптический микроскоп (р-СБОМ), предназначенный для инфракрасного спектрального диапазона.

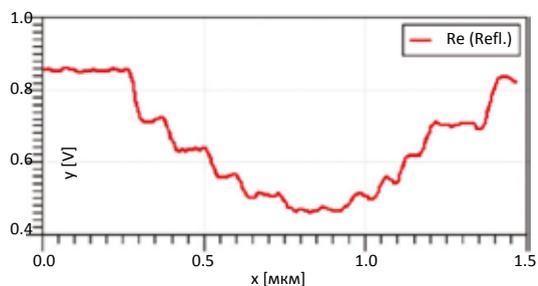
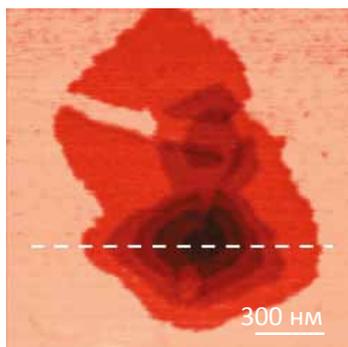
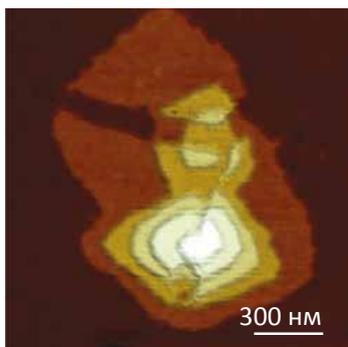
АСМ зонд располагается в фокусе оптической системы, направляющей излучение ИК лазера на образец и собирающей оптический отклик. Собранное излучение направляется в интерферометр Майкельсона для оптического анализа. Дальнепольная компонента собранного сигнала подавляется синхронным детектированием.

Система ИНТЕГРА ИК позволяет детектировать амплитуду и фазу ближнепольного сигнала. Пространственное разрешение получаемых контрастов отражения и поглощения составляет примерно 10 нм и определяется только размерами острия зонда.



Принципиальная схема ИНТЕГРА ИК

### СВЕРХТОНКИЕ ПЛЕНКИ: МОНОСЛОИ ОЛИГОТИОФЕНА НА КРЕМНИИ



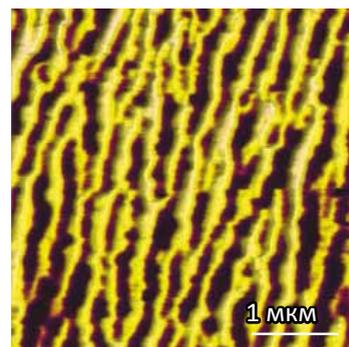
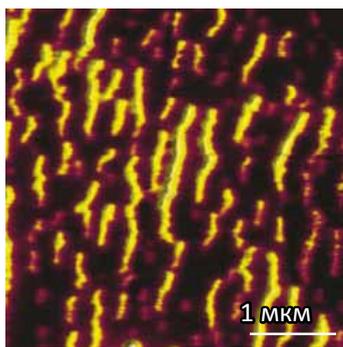
Рельеф (слева), отражение при  $\lambda = 10.6$  мкм (центр) и сечение сигнала отражения (справа). Образец представлен Dr. A. Mourran (DWI, Aachen, Germany). Измерения проводились Dr. G. Andreev (EVS Co)

Контраст ИК отклика между тонкими и мягкими слоями тиофена на кремнии легко различим. Каждая из пяти 3.4 нм ступеней разрешима. Пространственное разрешение составляет  $\sim \lambda/1000$ .

### ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД ПЛЕНКИ VO<sub>2</sub>: ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ МЕЖДУ ПРОВОДЯЩИМ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЯМИ

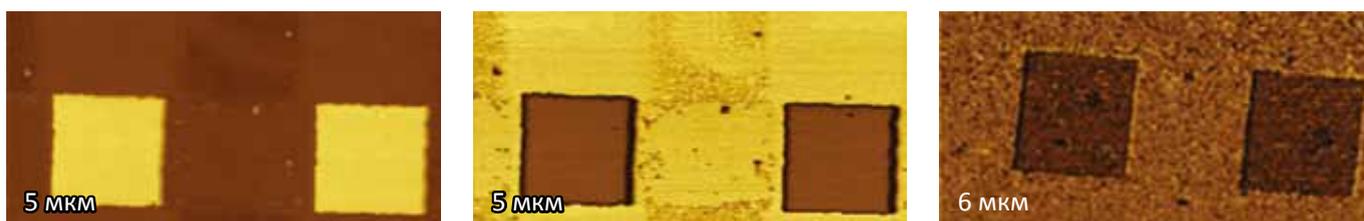
При нагреве пленка VO<sub>2</sub> демонстрирует фазовый переход между диэлектрическим и проводящим состояниями. Одни и те же участки были измерены при разных температурах. Светлые участки на изображении ИК отражения соответствуют проводящим доменам, темные участки — диэлектрическим доменам. Выше критической температуры проводящие домены смыкаются и пленка VO<sub>2</sub> становится проводящей на макроуровне.

Благодаря выполнению основных частей АСМ из титана система демонстрирует XY дрейф <1 мкм при нагреве от 27 °С до 67 °С, при этом перенастраивать оптику не требуется.



Наложенные на рельеф изображения контрастов отражения при 55 °С (слева) и при 67 °С (справа),  $\lambda = 10.6$  мкм. Образец представлен prof. Liu (Stony Brook University, New York, USA)

## Si-SiO<sub>2</sub> КАЛИБРОВОЧНАЯ РЕШЕТКА

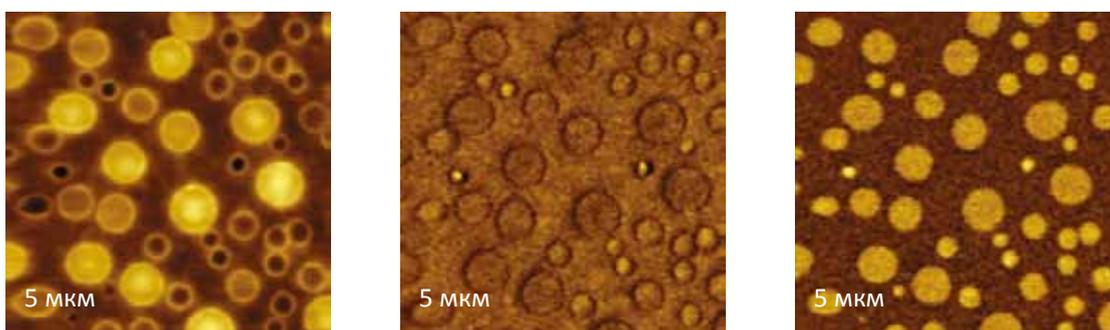


Изображения рельефа (слева), контраста ИК отражения (в центре) и сигнала dC/dZ (справа) Si-SiO<sub>2</sub> решетки

SiO<sub>2</sub> площадки (1.5 x 1.5 мкм) высотой ~20 нм располагаются на поверхности кремния. Благодаря различию величин реальных компонент диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_r$ ) этих материалов на длине волны 10.6 мкм квадратные блоки хорошо различимы на ИК изображениях. Для отображения локальных вариаций

диэлектрического отклика использованы АСМ-методики исследований электрических свойств. Более темная окраска SiO<sub>2</sub> площадок на dC/dZ изображении согласуется с меньшей величиной их проницаемости ( $\epsilon_r = 3.9$ ) сравнительно с той же величиной для Si ( $\epsilon_r = 11$ ).

## PS/PVAC ПЛЕНКА НА ПРОВОДЯЩЕЙ ИТО ПОДЛОЖКЕ



Изображения рельефа (слева), контрастов ИК отражения (в центре) и поглощения (справа) пленки PS/PVAC на ITO подложке

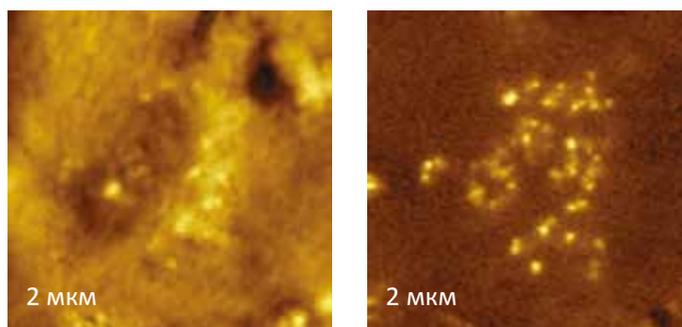
Изображение рельефа пленки полистирола с поливинилацетатом (PS/PVAC) на прозрачной подложке (ITO стекло) демонстрирует морфологию, где круглые домены различной высоты включены в относительно плоскую матрицу. Контраст в ИК отражении практически не отмечается на доменах и матрице, в то время как края доменов видны более отчетливо. Однако на

изображении ИК поглощения наблюдается высокий контраст круглых доменов, что позволяет соотнести их с PVAC (полимером, у которого существует линия ИК поглощения вблизи 10.6 мкм). Приведенные данные демонстрируют, что пространственное разрешение отображения ИК отражения и поглощения лежит далеко за дифракционным пределом ИК излучения.

## ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЙ ВУЛКАНИЗАТ

Термопластичный вулканизат является нанокомпозитом, изготовленным из смеси изотактического полипропилена и EPDM каучука, смешанных с частицами технического углерода. Такие образцы легко деградируют при рамановских исследованиях.

АСМ-ИК измерения таких образцов не только возможны, но и весьма успешны. Яркие наночастицы в центральной части изображения рельефа соответствуют углеродному наполнителю. Это подтверждается изображением ИК отражения, где углеродные наночастицы обнаруживают яркий контраст сравнительно с полимерной матрицей.



Изображения рельефа (слева) и контраста ИК отражения (справа) образца термопластичного вулканизата

### Лазеры и система ввода излучения

Подключение по оптоволокну для переключения между лазерными источниками. Также возможно прямое подключение лазеров.

CO<sub>2</sub> лазер: термоэлектрическое охлаждение, стабилизация, программный контроль длины волны CO<sub>2</sub> в диапазоне 10.3-10.8 мкм. Высокая стабильность мощности излучения: вариация мощности менее чем +/- 0.25% в течение 30 минут

Перестраиваемые источники среднего ИК диапазона 4 мкм - 11 мкм, свободные от перескоков мод: типичный диапазон перестройки источника до 60 см<sup>-1</sup>

Аттенюаторы обеспечивающие уменьшение мощности лазерного излучения без смещения лазерного пучка. Уровни пропускания: 0.05, 0.12, 0.2, 0.25, 0.45

### Интерферометрическая система

Компактный размер: Занимаемая площадь 45x30 см (45x75 см включая основание АСМ)

Стандартный объектив с апертурой 0.35 NA. Широкополосный (3-12 мкм) ИК светоделитель оптимизированный для р-СБОМ

Перемещение зеркала опорного луча и юстировка плеча интерферометра по углу наклона осуществляется пьезоприводами с обратной связью, что обеспечивает удаленную оптимизацию интерферометра

Низкошумящий КРТ приемник с азотным охлаждением: <30 нВ/√Гц в полосе 100 кГц – 1 МГц

Открытый дизайн: легкосъемный защитный кожух обеспечивает прямой доступ к интерферометру. Возможность добавления или замены оптических элементов

Модульная конструкция: все важные компоненты заменяемы, включая модуль прямого ввода излучения, детектор, светоделитель, коллимирующие и фокусирующие линзы

HeNe лазер для трекинга ИК луча и настройки оптической системы

### АСМ

Высококачественный АСМ с низким уровнем шума: Z-шум < 0.05 нм (СКО в полосе 10-1000 Гц)

10 нм АСМ и р-СБОМ (s-SNOM) пространственное разрешение

Низкий уровень дрейфа системы позволяет минимизировать паразитный сдвиг фазы между зондом и зеркалом интерферометра

Стабильные АСМ характеристики при высоких температурах: нагрев до 150 °С при помощи стандартного нагревательного столика

XYZ сканер с емкостными датчиками перемещения. Диапазон 100 x 100 x 10 мкм

Подвод образцом. Различная высота образца не требует оптической подстройки после смены образца

Автослежение за фокусом: область под зондом всегда в фокусе благодаря системе обратной связи и Z сканеру образца

Поддерживаются все стандартные АСМ и самые современные методы (включая KPFM, SRI, PFM, SCM)

Нерезонансная методика HybriD™ для картирования количественных наномеханических характеристик и физических свойств за счет прямых силовых измерений

### Программа управления

Автоматический поиск «горячей» точки («hot spot»): карта оптического поля позволяет за минуты находить максимум сигнала ИК отражения

Осциллограф: наблюдение в реальном времени действительной и мнимой компонент отражения или амплитуды и фазы поля

Настройка интерферометра: программная юстировка наклона зеркала опорного луча. Точность лучше чем 2 мкрад

Экспорт в формат сторонних программ (Excel, MatLab и т.д.)

# СВОЙСТВА БУФЕРНОГО ТРАВИТЕЛЯ ОКСИДА КРЕМНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

► С.О. Ранчин, И.В. Кирюшина  
ПАО "Микрон"

В данной работе рассматриваются свойства буферного травителя оксида кремния и особенности его использования в технологии изготовления интегральных схем. Показаны причины использования буферного травителя для травления оксида кремния с маской фоторезиста, рассмотрено влияние концентраций компонентов на поведение самого травителя и действие на поверхность пластины.

## **BUFFERED OXIDE ETCHER PROPERTIES AND USAGE FEATURES IN THE INTEGRATED CIRCUITS TECHNOLOGY**

**S.O. Ranchin, I.V. Kiryushina**

Micron PJSC

Buffered oxide etcher properties and usage features in the integrated circuits technology are considered in this publication. Buffered oxide etcher for silicon oxide with photoresist mask etching usage reasons are shown, componentry concentrations impacting on the etcher behavior and impact on wafer surface was considered.

**П**роцессы жидкостного химического травления оксида кремния в буферном травителе остаются востребованными для производства интегральных схем с проектными нормами до 45 нм включительно. Преимущества жидкостных процессов травления по сравнению с плазменными заключаются в том, что не образуются радиационные дефекты и полимерные остатки, отсутствует эффект загрузки (снижение скорости травления при увеличении площади взаимодействия плазмы с поверхностью), при этом жидкостные процессы, как правило, дешевле плазменных.

Поверхность пластины после обработки в буферном травителе должна удовлетворять основным требованиям, изложенным в таблице [1].

Исследования механизма осаждения химических веществ и микрочастиц из жидкой среды на поверхность полупроводниковых пластин

являются предметом многочисленных исследований [2]. При производстве интегральных микросхем репрограммируемой памяти типа FLASH информационной емкостью 1 и 8 Мбит именно химические загрязнения и микрочастицы ограничивают выход годных изделий и их надежность. Загрязнение микрочастицами является главным фактором, ограничивающим выход годных изделий. Плотность микрочастиц в следующих поколениях динамических запоминающих устройств (ДОЗУ) должна быть снижена в 4–5 раз для поддержания существующего выхода годных изделий [3].

Кислый раствор фторида аммония, названный буферированным фтористоводородным раствором (ВНФ) или буферным травителем оксида (ВОЕ), является очень важным химреактивом в технологии микроэлектроники в связи с его высокой реакционной способностью с материалами,

**Таблица.** Требования, предъявляемые к обработанной поверхности пластин на этапе формирования активной структуры (Front End Of Line – FEOL) при производстве изделий с субмикронными проектными нормами

№	Топологические нормы)	Наименование параметра			
		допустимая плотность поражающих дефектов ( $m^{-2}$ )	критический размер поражающего дефекта (мкм)	поверхностная концентрация металлических примесей (ат./ $cm^2$ ): – Al, Ca – Fe, Ni, Cu, Zn, Na	загрязнения органического происхождения в пересчете на углерод (ат./ $cm^2$ )
1	0,35	1 400	> 0,12	$1 \cdot 10^{11}$ $5 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{14}$
2	0,25	950	> 0,08	$5 \cdot 10^{10}$ $2,5 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{13}$
3	0,18	500	> 0,06	$2,5 \cdot 10^{10}$ $1 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{13}$
4	0,13	350	> 0,04	$1 \cdot 10^{10}$ $5 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{13}$
	0,10	200	> 0,03	$5 \cdot 10^9$ $2,5 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^{12}$
	0,07	150	> 0,02	$< 5 \cdot 10^9$ $< 2,5 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{14}$
5	Отсутствие водяных следов после сушки				
6	Отсутствие естественного оксида кремния				

в состав которых входит кремний. Это широко используемый химический реактив для таких процессов, как травление, формирование жесткой маски и очистки поверхности кремниевых пластин. Химический состав ВОЕ обычно состоит из смеси 40%  $NH_4F$  и 49 или 50%  $HF$ , в соотношении  $NH_4F$ :  $HF$  в диапазонах от 5 : 1 до 30 : 1 массовых частей. Высокие концентрации  $NH_4F$  используются для управления скоростями травления  $SiO_2$  и предупреждения воздействия  $HF$  с фоторезистом. В [4–9] рассмотрены эффекты различных концентраций  $NH_4F$  в ВОЕ; исследования проблем, связанных с высокой концентрацией  $NH_4F$  рассмотрены в работе [10].

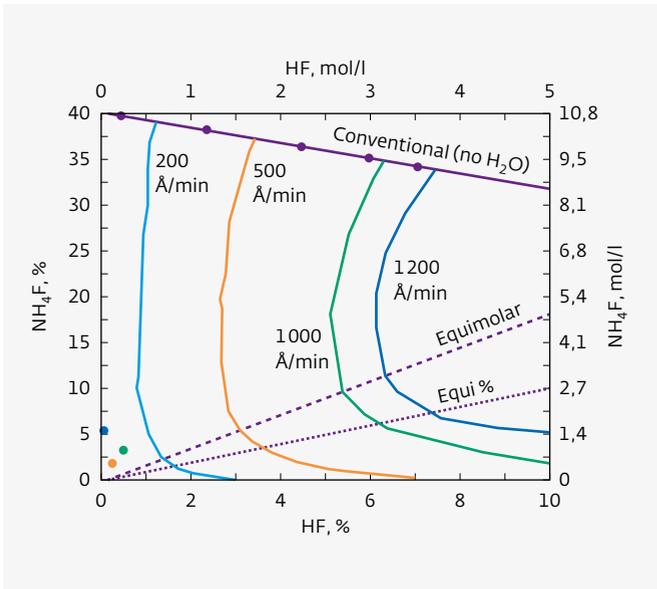
Высокая концентрация  $NH_4F$  в ВОЕ, как было продемонстрировано в [11], приводит к сегрегации кристаллита ( $NH_4HF_2$ ) в результате уменьшения растворимости ( $NH_4HF_2$ ) в ВОЕ.

Управление степенью смачиваемости поверхности после обработки в ВОЕ путем добавления поверхностно-активных веществ было рассмотрено

в работах [12–15], базируясь на десяти требованиях для передовых процессов жидкостных обработок. Необходимые требования включают сравнимые с традиционным раствором ВОЕ скорости травления, малый контактный угол смачивания, отсутствие сегрегации, отсутствие пенообразования, малое содержание микрочастиц, низкая концентрация примесей, малая адгезия микрочастиц на поверхность пластины, превосходная равномерность поверхности и высокая степень селективности. Свойства ультрачистых жидких химреактивов, в которых уровни загрязнений ниже 0,1 ppb рассмотрены в [16]. Накопление ионов металлов в технологических растворах при их эксплуатации исследовано в [17].

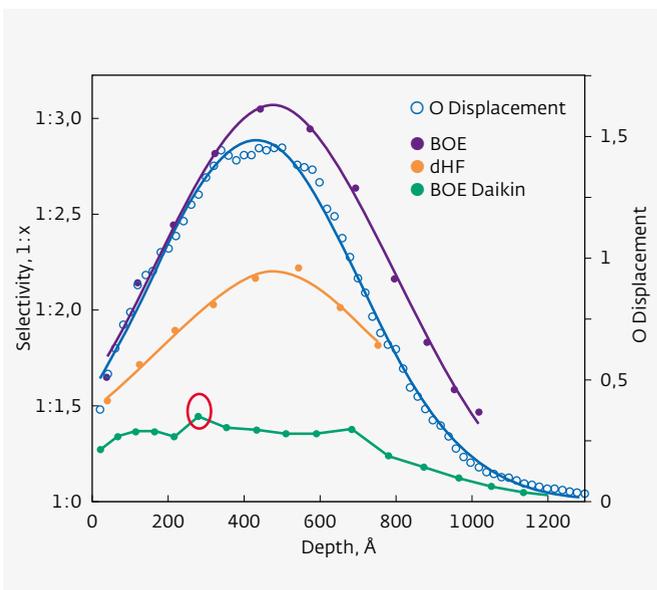
### ТРАВЛЕНИЕ ОКСИДА КРЕМНИЯ НА ПЛАСТИНАХ С МАСКОЙ ФОТОРЕЗИСТА

Плавиновая кислота ( $HF$ ), являющаяся основным травителем оксида кремния, не совместима

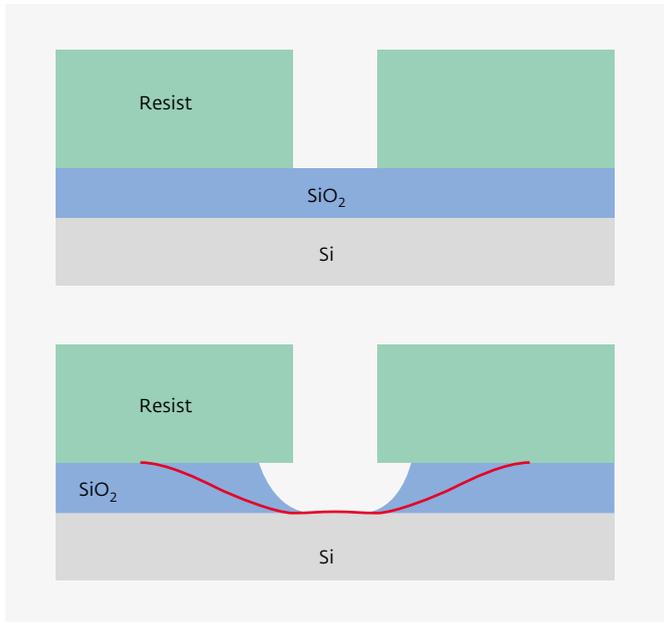


**Рис. 1.** Зависимость скорости травления термического оксида кремния в зависимости от концентрации компонентов в BOE (● – концентрация компонентов, используемого в ПАО "Микрон" BOE, ●, ○ – концентрации компонентов, имеющихся на рынке BOE)

с маской фоторезиста, особенно, если HF концентрированная, так как обработка приводит к эффекту поднятия фоторезиста и растраву защи-

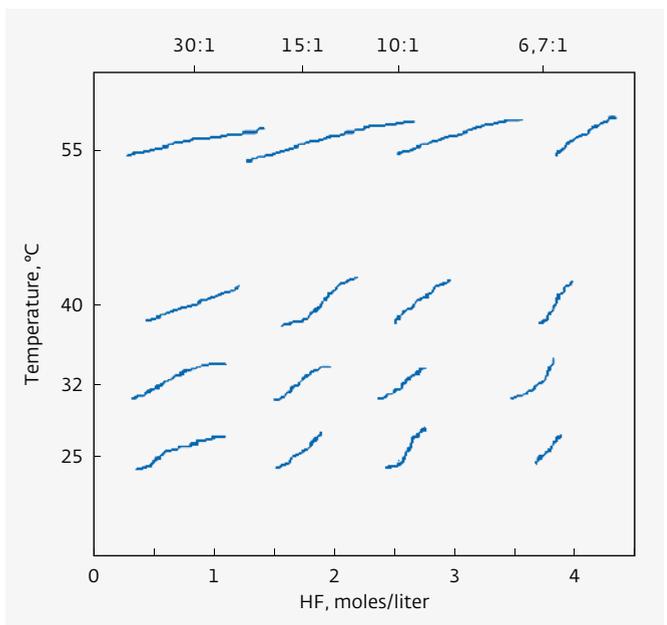


**Рис. 2.** Глубина травления, селективность и степень повреждения имплантированного оксида кремния в различных фторсодержащих химреактивах



**Рис. 3.** Схема травления SiO<sub>2</sub> в буферном травителе

щаемой поверхности. Скорость травления в HF оксида кремния, полученного методом химического осаждения из газовой фазы (Chemical vapor deposition - CVD) и оксида кремния, через который проводилась ионная имплантация, гораздо выше, чем для термического оксида кремния. В связи с вышесказанным проводят буферирова-



**Рис. 4.** Пиктограмма краевых профилей как функция температуры и концентрации HF

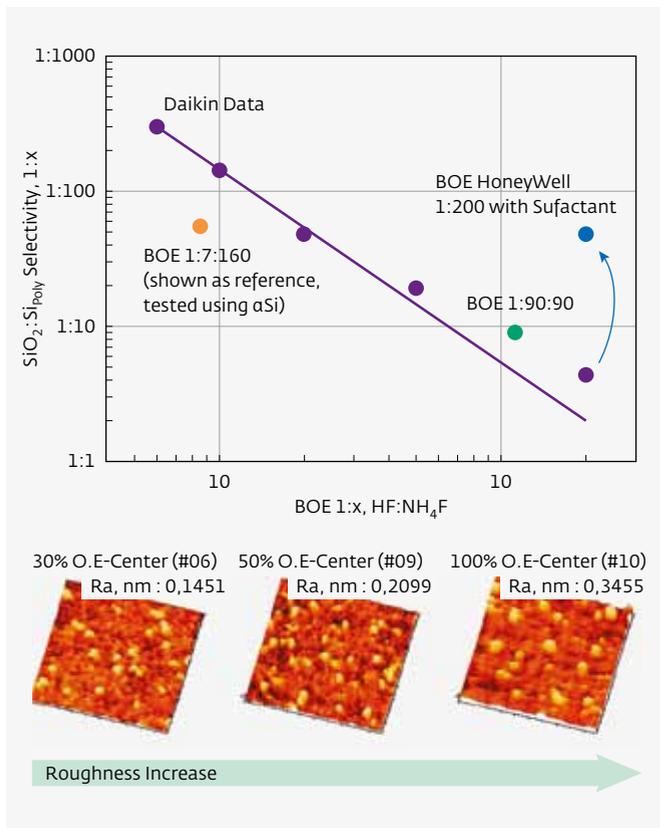


Рис. 5. Селективность травления SiO<sub>2</sub> к поликремнию как функция объемных соотношений в BOE (BOE 1 : x)

ние HF с помощью фторида аммония, в результате чего получают буферированный HF, или буферный травитель оксида (BNF или BOE соответственно), в котором значение pH близко к нейтральному показателю, так как в растворе присутствует соль. Наиболее технологичным является следующее соотношение компонентов в BOE: HF : NH<sub>4</sub>F : H<sub>2</sub>O = 1 : 7 : 160 (об. ч.).

Следует отметить, что BOE:

- является более дорогим химреактивом по сравнению с HF,
- менее стабилен,
- присущ потенциальный риск травления кремния (Si).

### СВОЙСТВА BOE

В BOE HF<sub>2</sub><sup>-</sup> является доминантной химически активной частицей (F<sup>-</sup> ион не взаимодействует с SiO<sub>2</sub>). Концентрация [HF<sub>2</sub><sup>-</sup>] в растворе повышается линейно до тех пор, пока не достигнет эквивалентного мольного соотношения NH<sub>4</sub>/HF, что является отличительной особенностью по сравнению с механизмом, когда увеличение концен-

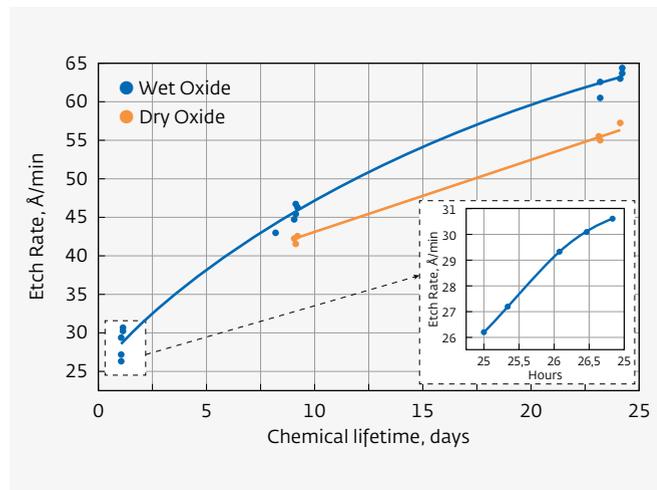


Рис. 6. Изменение скорости травления BOE 1 : 300 с течением времени

трации происходит при насыщении раствора. Как показывают исследования [10], скорость травления пленок термического оксида кремния, имеющих толщину 1 мкм, возрастает линейно пропорционально концентрации HF<sub>2</sub><sup>-</sup>, что наблюдалось при использовании различных составов BOE при 25 °C (рис. 1). Вертикальная ось соответствует массовой концентрации NH<sub>4</sub>F, горизонтальная ось соответствует массовой концентрации HF. Непрерывные линии показывают постоянные скорости травления 200 Å/мин, 500 Å/мин, 1000 Å/мин и 1200 Å/мин, как функцию массовой концентрации NH<sub>4</sub>F и массовой концентрации HF. Две пунктирные линии соответствуют наиболее применяемым составам BOE и эквивалентным мольным соотношениям.

### СЕЛЕКТИВНОСТЬ ТРАВЛЕНИЯ ИМПЛАНТИРОВАННОГО ОКСИДА КРЕМНИЯ

При проведении процессов ионной имплантации через слой оксида кремния происходит повреждение оксида (при этом также повреждаются слои кремния или нитрида кремния). Чем больше повреждение слоя (в SiO<sub>2</sub> уровень повреждения определяется фракцией O или Si, перемещенной с помощью имплантируемых ионов), тем выше скорость травления (рис. 2). Селективность травления имплантированного оксида кремния зависит от типа химреактива [18].

### ПОДТРАВ И КЛИН ТРАВЛЕНИЯ

Схема травления SiO<sub>2</sub> в буферном травителе представлена на рис. 3.

Подтрав (и, следовательно, поднятие маски фоторезиста) зависит от следующих факторов [19]:

- процесс фотолитографии (фоторезист, адгезив, термические /УФ-обработки и т.д.);
- содержание  $\text{NH}_4\text{F}$  в ВОЕ;
- температура (рис. 4).

## ТРАВЛЕНИЕ Si В ВОЕ

ВОЕ с высоким содержанием фторида аммония травит Si из-за генерации аммония в результате разложения  $\text{NH}_4\text{F}$  (рис. 5). Травление Si предупреждается путем добавления поверхностно-активного вещества [20].

## СТАБИЛЬНОСТЬ СЕЛЕКТИВНОГО ТРАВТЕЛЯ В ВАННЕ

Скорость травления в ванне с HF с течением времени возрастает, так как испарение ДВ происходит быстрее, чем испарение HF. Таким образом, концентрация HF в ванне увеличивается с течением времени. В травителях ВОЕ фторид аммония разлагается, образуя аммиак и HF. Чем выше содержание в травителе  $\text{NH}_4\text{F}$ , тем выше скорость травления с течением времени (рис. 6).

В нормальных условиях потребление реагентов во время травления является ничтожно малым [21]. Скорость разложения селективного травителя зависит от температуры травителя в ванне, влажности окружающей среды, парциального давления и т.д.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Кирюшина И.В.** Процессы жидкостной химической подготовки кремниевых пластин в производстве СБИС с субмикронными проектными нормами // Дис. на соиск. уч. степ. канд. тех. наук. - М.: НПЦ "СПУРТ", 2003. 191 с.
2. **Красавина Л.З., Кирюшина И.В.** Механизм адсорбции микрочастиц в жидких технологических средах и способы их десорбции // Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника. 2000-2001. Вып. 1(154)-1(155). С. 54-59.
3. **Грибов Б.Г.** Материалы для электроники: состояния и перспективы развития // Электронная промышленность. 1993. № 11-12. С. 30-36.
4. **Harrell S.H., Peoples J.R.**  $\text{SiO}_2$  etch rate in HF solutions // J. Electrochem. Soc. Extended Abstracts. 1965. Vol. 112.
5. **Judge J.S.** A study of the dissolution of SiO<sub>2</sub> in acidic fluoride solutions // Journal of electrochemical society. 1971. № 11. P. 1772-1775.
6. **Judge J.S.** Symp. on Etching for Pattern Definitions / ECS// Princeton // NJ. 1976.
7. **Tellier C.R., Matter J.** // Sci. 1982. Vol. 17.
8. **Яснoв В.С., Красавина Л.З., Кирюшина И.В., Новак Н.А., Бакеева Т.С.** Финишная обработка слабо концентрированными растворами плавиковой кислоты в системе рециркуляции при производстве изделий с субмикронными проектными нормами // Микро- и наноэлектроника 2001: Тез. докл. Всеросс. научн.-техн. конф. - Звенигород, 2001. Т. 2. P. 1-31.
9. **Кирюшина И.В., Красавина Л.З., Прoсий А.Д., Селиванова И.Н., Яснoв В.С.** Исследование процесса травления  $\text{SiO}_2$  и БФСС в травителе на основе HF в системе рециркуляционной фильтрации // Известия ВУЗов. 2004. № 2. С. 17-22.
10. **Kikuyama H., Miki N., Saka K., Takano J., Kawanabe I., Miyashita M., Ohmi T.** Principles of Wet Chemical Processing in ULSI Microfabrication // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. 1991. Vol. 4.No. 4. P. 26-35.
11. **Kern W.** Wet-chemical etching of  $\text{SiO}_2$  and PSG films, and an etching-induced defect in glass-passivated integrated circuits. - RCA Review, 1986. P. 186-202.
12. **Niki N., Kikuyama H.** Property-controlled high purity buffered oxide etchants for ULSI processing / 9<sup>th</sup> International Symp. Contamination Control Rec. // Institute of Environmental Science. Los Angeles, CA. Sept. 1988. PP. 26-30.
13. **Niki N., Kikuyama H., Kawanabe I., Takano J., Miyashita M.** Property controlled high purity buffered hydrogen for ULSI processing. Process capability technology II for LSI Processing / Wet Process Technology // Japan's Institute of Basic Semiconductor Technology Institute of Basic Semiconductor Technology Development. - Realize Inc: Tokyo, Japan, 1989. PP. 109-133.
14. **Kikuyama H., Miki N., Takano J., Ohmi T.** Developing property-controlled, high purity buffered hydrogen fluoride for ULSI processing // Microcontamination. Apr. 1989. PP. 25-28, 50-51.
15. **Kikuyama H., Miki N., Saka K., Takano J., Kawanabe I., Miyashita M., Ohmi T.** Surface active buffered hydrogen fluoride having excellent wettability for ULSI processing // IEEE Trans. Semicond. Manufact. Aug. 1990. Vol. 3. № 3.
16. **Miki N., Ohmi T.** Ultra pure liquid chemicals hydrofluoric acid / Technical Proc. SEMICON/EAST '89. - Boston, MA. Sept. 1989. P. 26-35.

17. **Кирюшина И.В.** Исследование накопления ионов переходных металлов в технологических растворах при их эксплуатации // Микроэлектроника и информатика – 2003. Десятая всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2003. С. 16.
18. **Kezuka T., Itano M. and Ohmi T.** The control of etching rate for various SiO<sub>2</sub> films // Cleaning technology in semiconductor device manufacturing // Proceedings of the Sixth International Symposium Proceedings Vol. 99-36. – 2000: The Electrochemical Society, Inc. P. 244-251.
19. **Wu H.C., Tu S.H., Yang M.C., Cooper E.** Selective Etching of Silicon Oxide versus Nitride with low Oxide Etching Rate // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 255. PP. 75-80.
20. **Marc. J. Madou.** Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology / Vol. II. – Manufacturing Techniques for Microfabrication and Nanotechnology: CRC Press, 2011. 670 p.
21. **Miyamoto M., Kita N., Ishida S., Tatsuno T.** Prevention of Microroughness Generation on the Silicon Wafer Surface in Buffered Hydrogen Fluoride by a Surfactant Addition / Proceedings of the third international symposium on Cleaning Technology in Semiconductor device manufacturing. – Proceedings Vol. 94-7: The Electrochemical Society, Inc., 1994. P. 214-221.
22. Handbook of Cleaning for Semiconductor Manufacturing. Fundamentals and Applications / Edited by Karen A. Reinhardt and Richard F. Reidy: Wiley, 2011. 590 p.

# ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ФОТОРЕЗИСТ ДЛЯ ВЗРЫВНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

► Н.А. Кузнецова<sup>1</sup>, Р.Д. Эрлих<sup>1</sup>, В.В. Соловьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «ГНЦ «НИОПИК», <sup>2</sup>ИФТТ РАН

Для технологии металлизации полупроводниковых пластин методом «взрывной» литографии разработан негативный фоторезист ФН-16У-7 – аналог импортного фоторезиста AZ nLOF 2070. Фоторезист работает на принципе «химического усиления», и в своем составе дополнительно содержит компонент, способствующий формированию отрицательного угла наклона маски фоторезиста. Продемонстрировано, что путем изменения концентрации этого компонента в негативном фоторезисте можно контролируемо управлять профилем фоторезистивной маски.

## DOMESTIC PHOTORESIST FOR LIFT-OFF PHOTOLITHOGRAPHY

N.A. Kuznetsova<sup>1</sup>, R.D. Erlich<sup>1</sup>, V.V. Solovyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FSUE "SSC" NIOPIK, <sup>2</sup>ISSP RAS

Negative i-line photoresist FN-16U-7 is analogous to AZ nLOF 2070 and formulated for lift-off lithography processes to create metallic interconnections on semiconductor substrates. FN-16U-7 uses the «chemical amplification» concept and contains an additional special component to promote the formation of a negative wall profile. It was demonstrated that by changing the component concentration one may finely tune the negative mask tilt.

**Т**ехнология формирования многих изделий микроэлектроники включает в себя металлизацию подложки методом «взрывной» литографии. Для успешного выполнения данного типа литографии необходимо наличие отрицательного угла наклона маски фоторезиста (нависающий профиль боковых стенок). На боковые стенки профиля с отрицательным наклоном металл не осаждается, что значительно облегчает процесс удаления «жертвенного» слоя, а также обеспечивает гладкость края формируемого элемента.

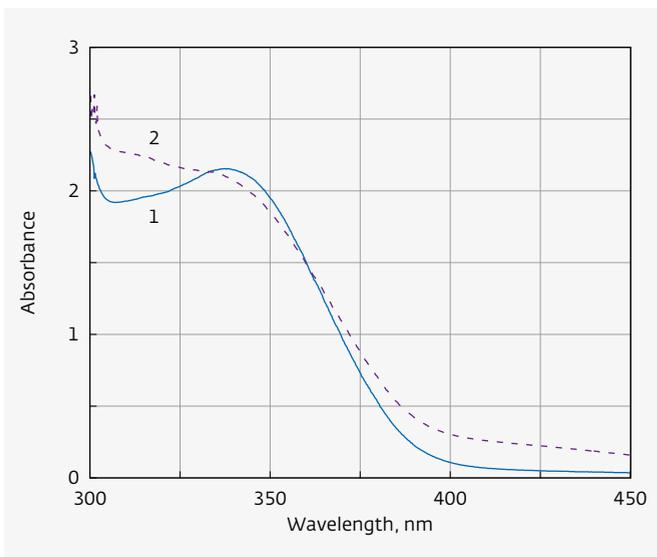
Практическое использование получили следующие методы получения отрицательного угла наклона маски:

- использование негативного фоторезиста [1];
- использование LOR-резиста [2];
- обращение позитивного изображения, сформированного при помощи реверсивного фоторезиста (Image Reversal Resist) [3];
- снижение растворимости верхнего слоя пленки фоторезиста перед проявлением [1].

Из указанных методов только использование негативного фоторезиста позволяет производить одностадийное нанесение фоторезиста и, следовательно, является наиболее простым методом взрывной фотолитографии. Он включает следующую последовательность технологических стадий:

- нанесение на подложку пленки фоторезиста;
- экспонирование;
- постэкспозиционное прогревание;
- проявление в пленке фоторезиста участков для металлизации подложки;
- покрытие металлом всей поверхности (как поверхности пленки фоторезиста, так и вскрытых участков подложки);
- удаление растворителем «жертвенного» слоя – пленки фоторезиста с осажденным на ней металлом. Металлический слой остается только на вскрытых участках подложки.

Негативный фоторезист ФН-16У чувствителен к i-линии (365 нм), является аналогом AZ nLOF 2000 и разработан специально для технологии металлизации методом «взрывной» литографии. Фото-

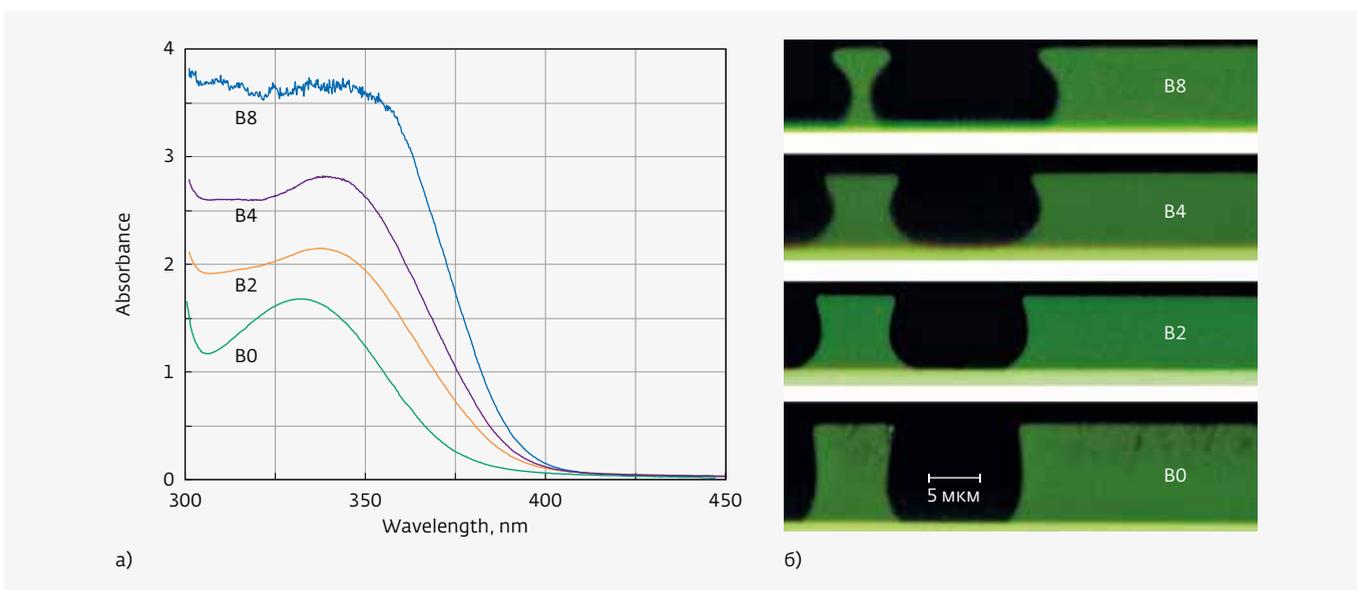


**Рис. 1.** Электронные спектры поглощения пленок фоторезиста ФН-16У-7 до (1) и после экспонирования (2). Толщина пленки 7 мкм, доза экспонирования – > 450 мДж/см<sup>2</sup>

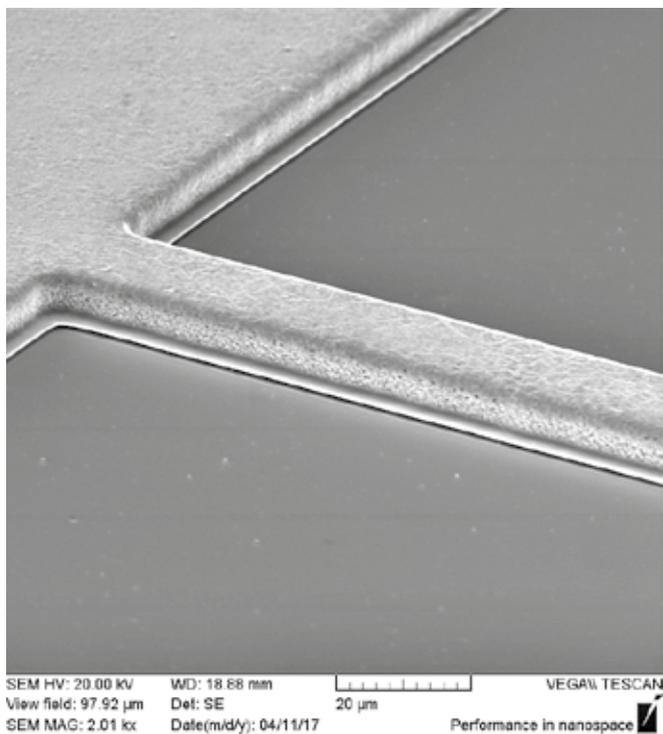
резист работает на принципе «химического усиления» скрытого изображения и в составе композиции содержит крезольную новолачную смолу, фотогенератор кислоты и сшивающий агент. Кислота, образующаяся под действием излучения из фотогенератора кислоты, катализирует темную реакцию

сшивки новолачной смолы. Только при температурах более 110 °С и только в экспонированных областях происходит сшивка пленки фоторезиста с образованием трехмерной структуры, практически нерастворимой в водно-щелочном проявителе.

Активное излучение при прохождении через пленку фоторезиста поглощается, поэтому верхние слои получают более высокую дозу энергии, чем нижние. Вследствие этого нижние слои пленки будут меньше «сшиты» и лучше растворяться в проявителе, что будет способствовать формированию отрицательного угла маски фоторезиста. Для усиления контраста в дозе излучения, полученной верхними и нижними слоями ФН-16У, в него введена специальная добавка, поглощающая активный свет. Светопоглощающий компонент (СК) не подвержен фотообесцвечиванию, вследствие этого поглощение активного света с длиной волны 365 нм пленкой ФН-16У в процессе экспонирования изменяется мало (рис. 1). Таким образом, на протяжении всего экспонирования обеспечивается эффективное снижение дозы активного излучения при проникновении света в нижние слои пленки фоторезиста, необходимое для формирования отрицательного угла наклона маски. Влияние концентрации СК на электронный спектр поглощения пленки и угол наклона маски фоторезиста демонстрирует рис. 2. Можно видеть, что с ростом концентрации СК и поглощения пленкой



**Рис. 2.** Электронные спектры поглощения (а) и скол фоторезистивного профиля (б) образцов ФН-16У-7, содержащих 0, 2, 4 и 8% (масс.) светопоглощающего компонента (образцы B0, B2, B4 и B8, соответственно). Изображение получено с помощью оптического микроскопа при увеличении ×500



**Рис. 3.** Фотография металлической разводки, полученной на ПАО «Сатурн» с использованием ФН-16У-7, содержащего 1% (масс.) светопоглощающего компонента

актиночного излучения наблюдается увеличение отрицательного угла наклона маски. Таким образом, путем изменения концентрации СК в негативном фоторезисте можно контролируемо управлять профилем фоторезистивной маски.

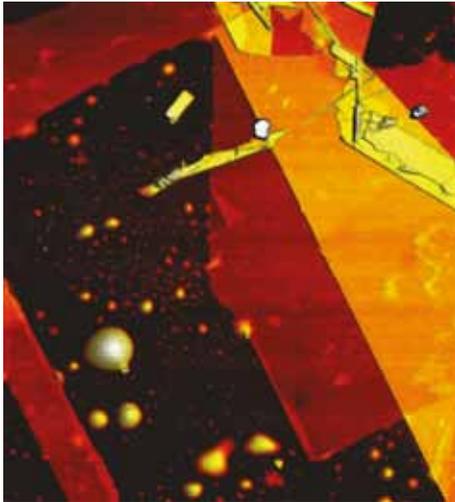
В заключение отметим, что негативный фоторезист ФН-16У пригоден для взрывной фотолитографии и без добавки СК. Однако добавка вплоть до 8% (масс.) позволяет производить металлизацию подложки и «взрыв» более надежно и качественно. В то же время следует иметь в виду, что рост концентрации СК приводит к увеличению дозы экспонирования. На рис. 3 приведена фотография металлической разводки, полученная при использовании для «взрыва» фоторезиста ФН-16У-7 с содержанием СК в количестве 1% (масс.).

Разработаны различные модификации ФН-16У, позволяющие получать толщину пленок от 0,5 до 10 мкм.

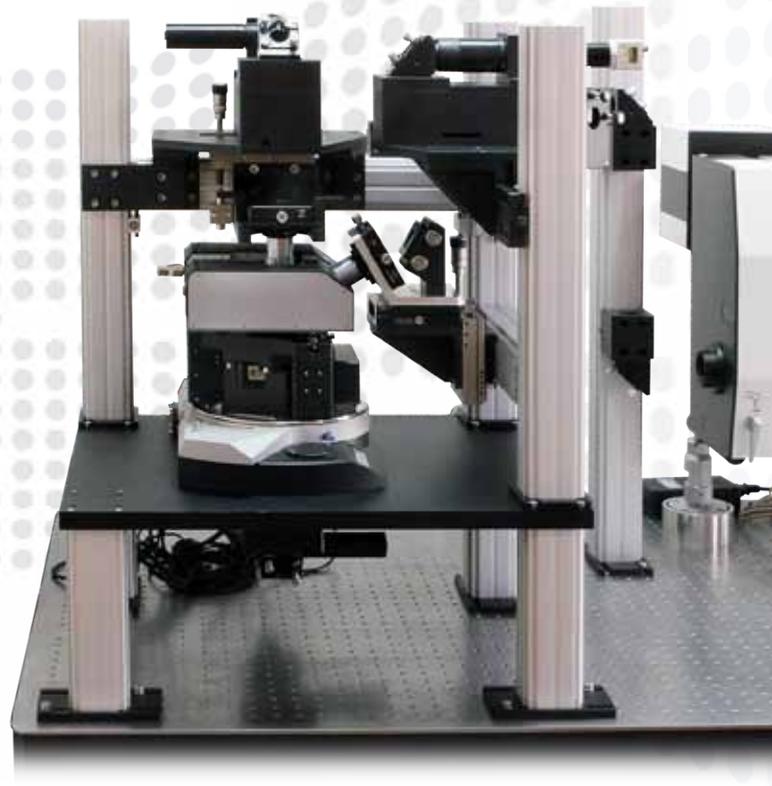
## ЛИТЕРАТУРА

1. **Моро У.** Микролитография. – М.: Мир, 1990. 1239 с.
2. LOR резист. URL: <http://frast.ru/LORresist.pdf> (дата обращения: 11.04.2017).
3. Processing image reversal resists. URL: [http://www.microchemicals.com/technical\\_information/image\\_reversal\\_resists.pdf](http://www.microchemicals.com/technical_information/image_reversal_resists.pdf) (дата обращения: 11.04.2017).

АСМ- Раман - СБОМ - TERS



Чешуйки графина на Si/SiO<sub>2</sub>, 2 x 2 мкм



# ИНТЕГРА Спектра II

- Автоматизированный АСМ высокого разрешения
- Конструктивные решения, оптимизированные для TERS-экспериментов: оптический доступ сверху, снизу и сбоку
- Модульная оптическая система позволяет реализовать любую конфигурацию возбуждения и сбора оптического отклика
- Автоматизированная настройка системы лазер-зонд-фотодиод
- Простая смена длины волны источника излучения оптической системы АСМ
- Легкая и точная настройка объективов

# ИНТЕГРА Спектра II – автоматизированная АСМ-Раман-СБОМ-TERS система

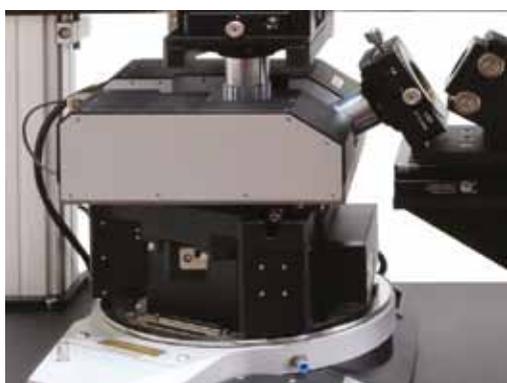
## ОБЗОР

Начиная с 1998 г. мы успешно интегрируем АСМ с методами оптической микроскопии и спектроскопии. Поддерживаются более 30 базовых и продвинутых АСМ методик, включая Hybrid Mode™, предоставляя обширную информацию о физических свойствах образца.

Интеграция АСМ с конфокальной рамановской/флуоресцентной микроскопией обеспечивает широчайший набор дополнительной информации об образце. Одновременное получение АСМ и рамановских изображений точно той же области образца предоставляет комплементарную информацию о физических свойствах (АСМ) и химическом составе (Раман) образца.



ИНТЕГРА Spectra II



Полный оптический доступ сверху, сбоку и снизу

Благодаря зондово усиленному рамановскому рассеянию (Tip Enhanced Raman Scattering, TERS) ИНТЕГРА Спектра II позволяет проводить спектроскопию/микроскопию с нанометровым пространственным разрешением. Специально изготовленные АСМ зонды (наноантенны) могут быть использованы в TERS для локализации и усиления излучения в нанометровой области около острия зонда. Такие наноантенны действуют как “наноисточники” излучения, давая возможность получения оптического изображения с разрешением на порядки лучше дифракционного предела (до ~ 10 нм).

Другим подходом к получению оптических и спектроскопических изображений является сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (СБОМ) с использованием апертурных зондов, обеспечивающая пространственное разрешение (~ 100 нм).

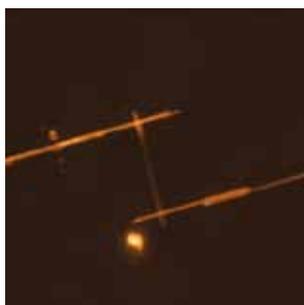
## CdS НАНОПРОВОЛОКА

CdS нанопроволока была соединена с металлическим электродом проволокой из проводящего полимера. Зонд АСМ позиционировался на структуре с помощью оптического микроскопа. Благодаря форме АСМ зонда луч лазера может быть сфокусирован непосредственно на острие зонда.

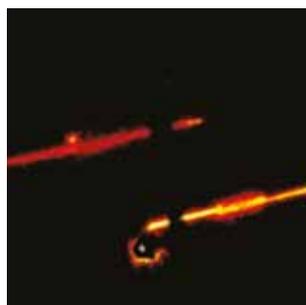
АСМ изображение высокого разрешения представляет информацию о рельефе образца. Рамановское и люминесцентное изображения того же участка показывают разницу в химическом составе нанопроволок.



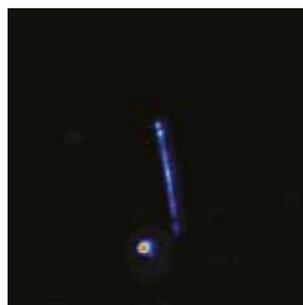
Оптическое изображение образца и подведенного АСМ зонда



Рельеф



Рамановское изображение (провода из проводящего полимера)

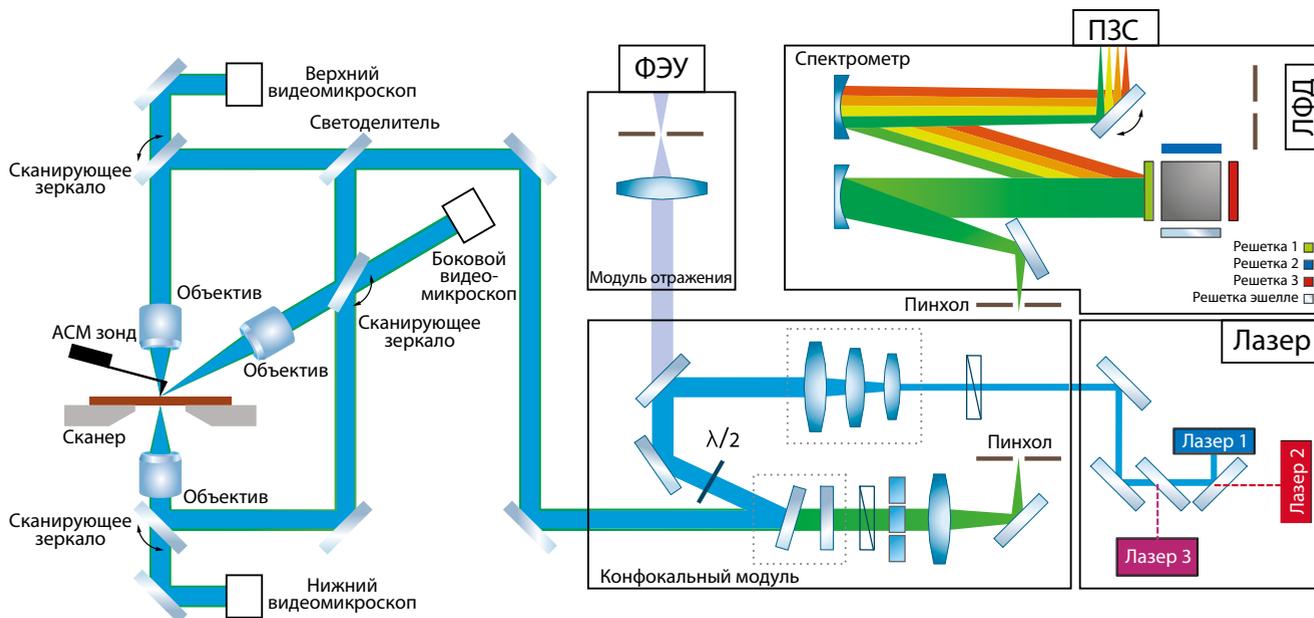


Фотолюминесценция (CdS)



Рамановский и ФЛ спектры CdS нанопроволоки

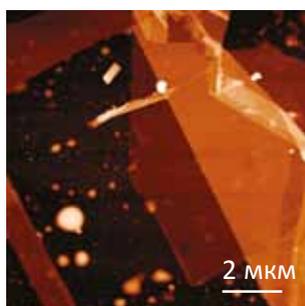
Образец представлен: prof. R. Carpick, Penn State University. Размер скана 20x20 мкм



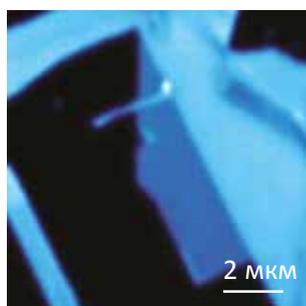
- Новая оптическая схема состоит из трех независимых каналов возбуждения образца: сверху, сбоку и снизу. Каждый канал реализован в виде независимого модуля.
- Смена направления возбуждения образца производится легким переключением. Сбор излучения может осуществляться как с помощью оптического канала возбуждения, так и любого другого оптического канала.
- Открытый дизайн обеспечивает прекрасные возможности модификации системы. Каждый конкретный канал позволяет наблюдать образец с помощью объектива с увеличением до 200<sup>x</sup>, возбуждать образец лазерным лучом и сканировать сфокусированным лазерным пятном по поверхности образца.
- Диапазон длины волны возбуждения - от 325 нм до 1064 нм\*.
- Система регистрации АСМ не зависит от рамановского объектива, что позволяет легко и быстро менять объективы, сохраняя положение точки фокусировки.
- Автоматизированная юстировка оптической системы АСМ сводит к минимуму действия пользователя по её настройке.
- Удобное для пользователя изменение длины волны оптической системы АСМ позволяет исключить взаимное влияние лазера оптической системы АСМ и рассеянного образцом излучения.
- Оптический перископ дает возможность объединять систему АСМ-Раман практически со всеми рамановскими спектрометрами, доступными на рынке.
- Спектрометр может быть снабжен различными детекторами – ФЭУ, ЛФД, ПЗС. Рэлеевское и рамановское изображения могут быть получены одновременно.

\* Совместимость с другой длиной волны по запросу

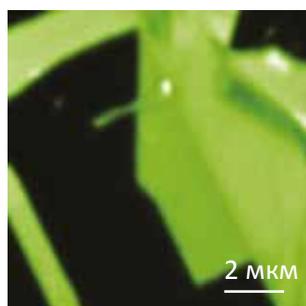
ЧЕШУЙКИ ГРАФЕНА Si/SiO<sub>2</sub>



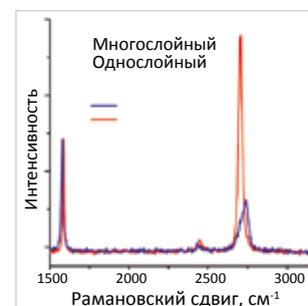
Рельеф



Интенсивность G полосы



Интенсивность 2D полосы



Рамановские спектры

### Конфокальная микроскопия

Конфокальная рамановская/флуоресцентная/рэлеевская микроскопия проводится одновременно с АСМ измерениями

Дифракционно ограниченное пространственное разрешение: <200 нм по XY, <500 нм по Z (с иммерсионным объективом)

Истинная конфокальность: моторизованный конфокальный пинхол для оптимального сигнала и конфокальности

Непрерывно перестраиваемый ND фильтр (диапазон 1-0,001) для прецизионного изменения мощности лазерного излучения

Моторизованный расширитель пучка/колиматор: настройка диаметра и коллимирование лазерного луча для каждого лазера и каждого объектива

Полностью автоматизированное переключение между различными лазерами - за несколько кликов мыши

Полная 3D (XYZ) конфокальная визуализация с мощным инструментариумом анализа изображений

### АСМ/СТМ: интеграция со спектроскопией

Низкошумящий АСМ: шум по Z <0,1 нм (СКО в полосе 10-1000 Гц)

Быстрая смена длины волны системы регистрации АСМ (670, 830, 1064 и 1300 нм), отсутствие паразитного влияния лазера АСМ на рамановскую спектроскопию

Автоматизированная настройка оптической системы АСМ (лазер-зонд-фотодиод)

Независимая от объектива система АСМ регистрации XYZ сканер образца с обратной связью (диапазон 100x100x10 мкм)

Отслеживание фокуса: образец всегда в фокусе благодаря Z обратной связи АСМ, что позволяет получать высококачественные конфокальные изображения шероховатых и наклонных образцов

Сменные держатели зондов (АСМ, СТМ и др.). Поддерживаются все стандартные АСМ методики (включая KPFM, SRI, PFM, SCM) в комбинации с конфокальной рамановской микроскопией

Нерезонансная методика Hybrid™ для количественного и высокоразрешающего картирования локальных свойств за счет прямых и быстрых силовых измерений

### Спектроскопия

Высокая оптическая эффективность 520 мм спектрометра с четырьмя моторизованными решетками

Доступны видимый, УФ и ИК диапазоны

Решетка Эшелле со сверхвысокой дисперсией для видимого, УФ и ИК диапазонов; спектральное разрешение: 0,007 нм (< 0,1 см<sup>-1</sup>)

Возможна установка до 3 различных детекторов:

- ТЭ охлаждаемые (до -100 °С) CCD/EMCCD камеры
- ЛФД в режиме счета фотонов или FLIM детектор
- ФЭУ для быстрой конфокальной лазерной микроскопии

Гибкая моторизованная поляризационная оптика в каналах возбуждения и детектирования, поляризационные рамановские измерения

ТГц рамановская спектроскопия: <10 см<sup>-1</sup> с Брэгговскими объемными фильтрами

Гиперспектральная визуализация (запись полного рамановского спектра в каждой точке 1D, 2D и 3D конфокального скана) с дальнейшим программным анализом

### Система ввода-вывода излучения

Оптический доступ излучения к образцу сверху, снизу и под углом 30 градусов к плоскости образца

Использование высокоапертурных объективов одновременно с АСМ: до 1,45 NA для инвертированной, до 0,7 NA для прямой, до 0,7 NA для конфигурации с боковой засветкой

Легкосменные объективы на кинематических держателях: воспроизводимость установки <2 мкм

Двойное сканирование: сканирование образцом и сканирование лазерным пятном (для нахождения точки усиления TERS)

Сканирующие с обратной связью зеркала для точного позиционирования лазерного пятна на зонде (важно для СБОМ, TERS). Конфигурации с прямой, инвертированной и боковой засветкой: 50x50 мкм со 100x объективом

Детектируются все СБОМ сигналы: интенсивность лазерного излучения, флуоресценция и спектроскопия. Поддерживаются все СБОМ оптические схемы: на пропускание и отражение, сбора и рассеяния излучения (p-СБОМ)

Доступны все TERS геометрии: засветка/сбор сверху, снизу, сбоку

# ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ТЕХНОЛОГИИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА: ЧАСТЬ 1. УРОВНИ ОПИСАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ

► Г.Я. Красников, Е.С. Горнев, И.В. Матюшкин

АО «НИИ молекулярной электроники»

Приводится обзор существующих подходов к пониманию и описанию технологических процессов (технологии). На их фоне формулируется авторская концепция «общей теории технологий» как раздела общей теории систем. Указывается место микроэлектроники в истории и современном древе технологий.

## GENERAL THEORY OF TECHNOLOGY AND MICROELECTRONICS: PART 1. LEVELS OF TECHNOLOGY

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

MERI JSC

A review of existing approaches to understanding and describing technological processes (technology) is given. Taking into account these approaches the author's conception of the "General Theory of Technology" is stated as a part of the General Systems Theory. The place of microelectronics in history and modern technology tree is indicated.

**Н**а рубеже веков (1998–2000 гг.) авторами были опубликованы некоторые работы [1–4, 5–6], где обосновывалась актуальность разработки некоторой «общей теории технологических процессов» и обозначались ее контуры. По ряду причин эти работы теперь недоступны широкой публике. Кроме того, за прошедшие почти 15 лет эта идея получила независимое и в то же время фрагментарное развитие в работах других исследователей. Поэтому актуально, особенно в свете инновационного развития микроэлектроники, вернуться к созданию общей теории технологий (ОТГ, general technology theory) в более систематичном виде.

В последние 10–20 лет слово «технология», по-видимому, становится также затасканным, как и «любовь»: высокие технологии, нанотехнологии, бизнес-технологии, технологии предпринимательства, технологии туризма, технологии инноватики, программные технологии, нейросетевые технологии и, конечно, информационные, когнитивные и политические технологии. Даже школьный предмет, известный ранее под названием «Труд», теперь по западной моде повысил статус и стал называться

«Технология» (в программах обучения в колледжах Европы и США мы находим дисциплину General Technologies). Часто употребление понятия «технология» оказывается поверхностным и бессодержательным. Что же такое «технология»? Несмотря на обилие примеров вокруг нас, дать определение абстрактной технологии затруднительно и даже невозможно.

Человек окружен разнообразными техническими устройствами. Их появление обусловлено развитием технологий (и наоборот). Технологии существуют не только в сфере техники, но также в биологических системах, будучи созданными природой (телесное здоровье есть результат согласованности биохимических технологий, которые изобрела эволюция); в области социологии и психологии, являясь результатом длительного и еще мало познанного становления человеческого общества. В качестве близкого примера из области техники можно взять технологию микроэлектроники, которая принята нами за «реперную точку». В биологии известны, например, процесс трансляции ДНК, цикл трикарбоновых кислот и т.д. Часто клетку называют «заводом», митохондрию – энергетической станцией этого завода. Важное психолого-социальное значение

имеет учебный процесс, подготовка квалифицированных кадров для той же микроэлектроники.

«Технологии повсюду!» – таков девиз ОТТ, созвучный лозунгу создателя общей теории систем (ОТС) Людвиг фон Бергаланфи. Что касается определения технологии, то ограничимся пока коротким: «Технология – это овеществление алгоритмов».

Исходной точкой нашего рассуждения является тезис о том, что ОТТ есть самостоятельный раздел ОТС, аналогичный кибернетике (наука о связи и управлении в системах), синергетике (наука о процессах самоорганизации и сложности), теории информации (изучает потоки и метрики информации), системотехнике (наука о проектировании систем, главным образом, технических) или системному анализу (в отличие от предыдущих разделов дифференциации подлежит не какой-то аспект, а область приложения – в данном случае экономические системы). Предпосылки возникновения ОТТ лежат в 50-х годах XX в., одновременно с оформлением ОТС.

В настоящее время приходится констатировать, что за полувековую историю ОТС, как и ее разделы, призванные внутри себя привести ограниченное множество систем к одному «знаменателю», оказалась мертворожденной. Уж очень не похожи системы друг на друга, уж очень много аспектов (одних определений термина «система» около 35) исследования, чтобы свести все к единому формальному знанию, как успешно сделано в естествознании (физика). Чуть лучше, но только чуть, получилось у кибернетики, которая все-таки может указать на теорию автоматизированных систем управления (АСУ), или у информатики (формула Шеннона, теорема Котельникова). По-прежнему размыты очертания синергетики, рассматриваемой многими как «преднаука». И даже в современной отечественной литературе исчезли упоминания о системотехнике.

Поэтому, предлагая новое начинание ОТТ, важно не повторить прошлых ошибок развития ОТС (а ведь разнообразие технологий также велико!). Можно попытаться строить формально-математическое ядро ОТТ одновременно с интеграцией в него конкретного опыта частных [7] технологий. Например, рассматривая исторический опыт технологии виноделия (см. прекрасную статью Иукуридзе Э.Ж. и др. [8]), следует задаться вопросами: «А укладывается ли она в текущую схему абстрактной технологии?», «Куда именно в матрицу классификации технологий попадает эта технология (если не попадает, то данная классификация ущербна)?», «Какие уроки может извлечь ОТТ из этого частного случая путем аналогии и обобще-

ния?» Но чтобы эти вопросы не оказались преждевременными, нужно, грубо говоря, «навести порядок» в сфере изучения технологий. В качестве первого шага мы предлагаем пятиуровневый подход к описанию технологий. Заметим, что сам принцип иерархичности описания довольно распространен – на те же 4–6 уровней разбивают маршрут проектирования СБИС, в экологии также часто рассматривают лесенку снизу вверх: «клетка – организм – популяция – экосистема – биосфера».

Следует выделить два подхода к взгляду на технологии. Первый характерен для отечественных исследователей и базируется на ОТС-представлениях; назовем его «кибернетическим». Второй подход активно развивается на Западе, ограничен только технологиями в технике и озабочен взаимовлиянием между техникой (технологиями), экономикой и культурой; назовем его «социоисторическим». Масса публикаций отечественных экономистов (Глазьев С.Ю.) о технологических укладах привела к экспансии второго подхода при почти полной «слепоте» (и у нас, и за рубежом) в отношении первого подхода. Формулируя ОТТ, мы придерживаемся кибернетического подхода, а большую часть публикаций социоисторического плана считаем относящейся к уровням описания «технология» / «система технологий» ОТТ.

## БИБЛИОГРАФИЯ: КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

В переводе с греческого «технэ» (τέχνη) – искусство, мастерство, умение, ремесло; и, таким образом, ремесленничество было рудиментарной формой технологии. В конце XVIII века в общем массиве знаний о технике стали различать традиционный описательный раздел и новый, нарождающийся, который получил название «Технология». Иоганн Бекман (1739–1811) ввел в научное употребление термин «технология» или «Наука о ремесле», которым он назвал научную дисциплину, преподаваемую им в германском университете в Геттингене с 1772 года. В 1777 году он опубликовал работу «Введение в технологию». Сущностью «кибернетического» подхода является тезис о единстве принципов организации технологий в технических, биологических, экономических, информационных и социальных сферах жизни, откуда следует потенциальная возможность описания абстрактной/формальной «технологии».

Современной точкой отсчета для него можно считать публицистическую работу польского писателя-фантаста **Станислава Лема** «Сумма Технологии» [9], проникнутую идеями кибернетики. Впервые Summa

Technologiae вышла в 1963 году с аллюзией в названии на классический богословский трактат Фомы Аквинского Summa Theologiae (лат. – Сумма теологии). Так была выражена вера во всемогущество технологий. Практически незамеченной оказалась книга академика РАН А.М. Уголева [10], где он на примере пищеварения показывает плодотворность технологической аналогии в физиологии. Затем следует указать на две работы [11–12] Санкт-Петербургских авторов Н.В. Романенко и Г.В. Никитиной 1994 и 2011 годов соответственно. Первая – практически недоступна, а вторую – «Общие технологии» – еще можно найти в Интернете. На настоящий момент это наиболее систематизированная и притом довольно удачная попытка построения ОТТ. Идея ОТТ представлена ярко, приведено много примеров, а сама работа имеет структуру университетского учебника с множеством определений, утверждений, графических формализаций и классификаций. При всех усилиях авторов придать ОТТ стройность им не удалось создать формальное ядро (не говоря уже о каких-либо математических структурах), а некоторые определения и уточнения туманны.

Теперь перейдем к менее значимым и более частным попыткам. Отметим статью С.М. Крылова «Формально-технологические модели в общей теории систем» (Самара, 2003) [13], а также две его смежные работы [14–15], где уже появляются теоретико-множественные конструкции. По С.М. Крылову, «под формальной технологией Т понимается упорядоченная пара  $\langle A, F \rangle$ , состоящая из двух конечных множеств: множества  $A$  некоторых исходных типов элементов (объектов) материальной или нематериальной природы, называемых обычно элементами базы (или базовыми элементами):  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ , и множества операций  $F$  над элементами базы...». Указывается на связь «временной системы» и эмерджентных свойств с абстракцией алгебраической системы. Однако с тех пор автор оставил «технологическую» проблематику.

Д.А. Андреев (Псков, 2011) в [16] исследовал вопросы технологического знания, а в последующих работах [17–18] предложил уже математическую конструкцию «онтологии технологического действия». Как пишет Д.А. Андреев, «под термином «технология» будем понимать объем знаний о том, каким образом преобразовать конкретно данное (исходное) в требуемое (необходимое, ожидаемое)», то есть автора интересует скорее не сам «овеществленный алгоритм», а способы выражения наших технологических знаний, что, на наш взгляд, неоправданно сужает рамки ОТТ.

Общее наше замечание по попыткам математизировать ОТТ можно сформулировать таким образом: они преждевременны, поскольку нужно вначале завершить концептуальный анализ проблематики ОТТ (хотя в ряде случаев можно заимствовать какие-то конструкты из других областей). Не нужно здесь злоупотреблять математикой ради наукообразия и за ее роскошными формами скрывать дефекты содержания.

Упомянем еще работу Г.Я. Булатова (Санкт-Петербург, 2011) [19], где автор пытается делать обобщения на основе технологий строительства. Интерес вызывает введенное им понятие «технологического атома», определяемое как минимальный объем/порция вещества, который возможно технологически обработать. Пример: объем ковша (земли) экскаватора. Аналогия из микроэлектроники, возможно, неточная – норма проектирования (технологическая норма). Кроме того, вводится классификация технологий (в нашей терминологии – технологических операций) по четырем типам:

- приводящих к увеличению количества вещества;
- приводящих к уменьшению количества вещества;
- приводящих к перераспределению вещества;
- приводящих к транспортировке вещества.

По первым трем типам можно вспомнить аналогичную классификацию (авторство, возможно, принадлежит К.О. Петросянцу, [20]), например: осаждение, травление, отжиг (с рекристаллизацией), а по четвертому – транспорт кремниевых пластин в СМIF-контейнерах или еще каким-то образом; можно назвать это скрытой технологической операцией, так как ее обычно не включают в технологический маршрут изготовления СБИС.

В работах [21–22] подкупает ярко выраженный «технологический» подход к образованию: в первой рассматривается ретроспектива динамики европейских университетов, во второй – модульность современных учебных дисциплин. Проблема ОТТ в них не ставится, но, несомненно, полезный для приложения ОТТ в социально-когнитивном поле материал имеется.

Никоим образом не стоит забывать накопленный человечеством за последние полвека опыт в двух областях: химической технологии [23] (и металлургии) и технологии приборо- и машиностроения [24–25]. В ряде руководств, в том числе и учебных, обнаруживаются попытки обобщения и определения общих понятий; более подробно мы рассмотрим их в следующих частях. Например, анонимный автор из Воронежа [26] написал учебно-методический комплекс «Теория технологии»: здесь идея ОТТ присутствует,

но многое компилятивно. Экономисты также обращаются к технологии и производству и заимствуют ряд определений у исследователей в частных технологиях. Можно упомянуть компиляцию Е.П. Никифоровой [27].

Другим источником материала для ОТТ служат работы по теории технических систем (ТТС) [28–31]. Сама эта теория молодая. Истоком ТТС является теория машин и механизмов, начиная от Франца Рело (сер. XIX в.). Как оказывается, очень непросто дифференцировать техническую систему от абстрактной системы. Взаимоотношения между ТТС и ОТТ рассмотрим чуть позже.

Некоторые ГОСТы также могут оказаться полезными при концептуализации ОТТ. Например, вполне трезвое определение технологической операции «как наименьшей части технологического процесса» дано в ГОСТЗ.1109-82.

## БИБЛИОГРАФИЯ: СОЦИОИСТОРИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Социоисторический подход ставит фокусом исследований вопрос – как влияли, влияют и будут влиять технологии на историю человечества (и самого человека)? Технологии по умолчанию считаются техническими, иногда информационными. Условной точкой отсчета можно считать работы американского социального философа, историка и архитектора-проектировщика (первого исследователя урбанизма) **Льюиса Мамфорда** в 30-х годах XX века. Идеи Мамфорда прослеживаются уже в работе 1938 года «Культура городов», но наиболее известным его трудом является «Миф машины» [32] (1967). В ней помимо оспаривания односторонности марксистского тезиса «бытие определяет сознание» (в форме: труд и технологические новации определяют прогресс общественных форм) выдвигается концепция Мегамашины – наиболее хозяйственно-эффективного состояния общества и государства, лишь считанное число раз достигнутого во всей истории человечества (Египет, Рим и, возможно, современные США).

Помимо культурологов экономисты разного калибра (в смысле: микро- и макро-, т.е. экономик предприятия и стран) сосредоточились на проблеме внедрения изобретений, промышленных инноваций и научно-технического прогресса (НТП) в целом. Характерным примером популяризации таких работ может служить эссе о колесе Бердена [33]. На фоне этих публикаций выделяется своей глубиной и основательностью, что косвенно подтверждается многочисленным цитированием, книга индийского теоретика **Девендры Сахала** *Patterns of Technological*

*Innovations* [34] с неудачным переводом названия на русский (1981).

Возможно, к источникам ОТТ следует причислить классический труд [35] австрийского и американского экономиста **Йозефа Шумпетера** «Теория экономического развития» (1911), где исследуется проблема инноваций и нововведений, ее связь с циклами Кондратьева; эта работа считается фундаментальной с точки зрения современных исследователей [36] «технологических укладов».

К настоящему времени существует достаточно много экономико-математических работ, пытающихся смоделировать НТП, наиболее известные принадлежат Мюррею Брауну [37–38] и Роберту Солоу [39]. Примечателен эквивалент банального *technical progress* в специализированной литературе: НТП трактуется как технологическое изменение (чаще переводят – сдвиг), *Technological Change*; само представление и термин НТП возник в 30-е годы XX века. В экономические модели особенности технологии вводятся тяжело и формально [40], через производственную функцию (чаще в степенной форме Кобба – Дугласа):

$$G = A(t) \cdot f(C, L), \quad f_{Cobb} = C^a L^b,$$

где  $G$  – выпуск продукции,  $C$  – капитал,  $L$  – труд,  $t$  – время,  $A$  – «кумулятивный эффект от (смены) технологии» [40].

Отметим ряд недавних диссертаций, защищенных в Нидерландах в университете г. Маастрихт [41–43]. В последней работе используется сравнительно новая техника мульти-агентного моделирования, идеологически близкая к клеточным автоматам. Задача предсказания НТП ставилась давно [44], но при всем многообразии моделей НТП по-прежнему актуальна скептическая фраза Д. Сахала: «Наши познания в теории технического прогресса во многом остаются весьма смутными и носят фрагментарный характер». Кроме того, по нашему глубокому убеждению, проблематика ОТТ на высоких уровнях отнюдь не сводится к проблемам НТП и диффузии технологий (термин ввел Д. Сахал).

В качестве иллюстрации к сказанному опишем парадокс Солоу [39], действительно наблюдаемый в недавнем прошлом: «инвестиции в компьютеризацию производства по рынку в целом не приводили к увеличению прибыли или улучшению производительности труда». Если кратко, «информатика влияет на все, кроме показателей производительности». По Стюарту Макдональду, информационные технологии (ИТ) внедрялись гораздо позже

изобретений в вычислительной технике 40-х годов, и это происходило в пять этапов.

I этап. Первое время, когда не так много было известно о последствиях инвестиций в ИТ, на такие вложения возлагали огромные надежды и ожидания. Идея инвестиций в ИТ была настолько новой, что существовали теории, которые считали, что ИТ полностью вытеснит труд. При этом считалось, что производительность труда является идеальным показателем для измерения эффективности инвестиций в ИТ;

II этап. Начался в конце 1970-х годов. Были отмечены первые признаки того, что результат от инвестиций в ИТ намного меньше ожидаемого. Однако компании продолжали вкладывать огромные ресурсы в ИТ и даже не пытались оценить возможный эффект от подобных вложений.

III этап. В начале 1980-х годов пришло осознание (скорее оправдание огромных ненужных затрат), что вложения в ИТ были сделаны не ради производительности, но ради создания ИТ-стратегии и конкурентного преимущества.

IV этап. К концу 1980 года инвестировать в ИТ стали не просто как в «железо», но и как в их результат – информационные системы. При этом уже строились разумные ожидания от таких вложений. К этому же времени начали появляться первые объяснения парадокса эффективности.

V этап. Конец 1980-х годов. Большая часть инвестиций в ИТ сосредоточена в области телекоммуникаций. Ожидания повышения производительности в результате инвестиций в ИТ и ИС (здесь и далее – информационные системы) максимально снижены.

Разрешение парадокса состоит, по-видимому, не в том, чтобы критиковать упрощенный способ обработки статистических данных по промышленности, а в том, что сама структура продукции усложнялась без видимого наращивания цены или дохода. Поясним примером из области программирования: текст программы под MS-DOS намного проще текста программ с оконным интерфейсом (Windows-программы), а скорость программирования не возросла даже с появлением мощных сред разработчика, но ведь и возможности программ с оконным интерфейсом (Windows-программ) несравнимо выше.

Из современных работ по НТП можно отметить [45–47]. Часть исследователей [48–49] пошла по пути выделения *general purpose technologies*, что лучше перевести как «критические технологии». Укажем в этой связи на вполне официальный документ – «Перечень критических технологий Российской Федерации». Выражаясь математически, образуем множе-

ство среди существующих в некоторое историческое время технологий и выделим из него подмножество таких, инновации в которые приведут к быстрому приращению национального богатства. Эти технологии критические, ключевые. В конце XIX века, например, такая технология была связана с паровым двигателем, а в совсем недавнее время – с Интернет. Любопытно отметить, что зарезервированный нами термин *general technology theory* был случайным образом использован в достаточно сложной и неясной работе [50] при оценке влияния информационных технологий на организационные структуры экономики.

Среди отечественных публикаций социоисторического направления отметим учебник [51], а среди наиболее близких ОТТ – статью проф. С.В. Кричевского [52] (Москва, 2015) об «основаниях общей теории технологий» с акцентом на экологический аспект. Автор констатирует следующее:

- ОТТ пока нет;
- проблема «инвентаризации» технологий есть и является сложной;
- всю существующую технику можно описать множеством технологий, точнее: «Конкретный технический объект в «статике» (его конструкция) – это множество элементарных технологий, реализованных и материализованных в нем»;
- существуют кластеры технологий и техноценозы.

Автор рассматривает ОТТ как часть «общей теории эволюции в научной картине мира» и декларирует 11 пунктов структуры ОТТ.

## УРОВНИ ОПИСАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Понятийный анализ технологии начнем с выделения нескольких уровней ее описания (см. рис. 1.). Под технологической операцией (ТО) будем понимать законченное целенаправленное изменение состояния одного или нескольких полуфабрикатов одновременно, производимое в течение конечного промежутка времени при участии одной единицы оборудования и расходных материалов. В микроэлектронике прижился жаргонизм называть ТО технологическим процессом (определение последнего см. далее). Например, ионная имплантация. Под «технологическим маршрутом» (ТМ) мы понимаем такую последовательность технологических операций (из заданного набора), совершаемых в определенном технологическом режиме, в результате которой воспроизводимо достигается желаемое изделие при заданном уровне контроля и тестирования. Например, маршрут изготовления силовых приборов микроэлектроники. Под «производственным процессом» (ПП) мы

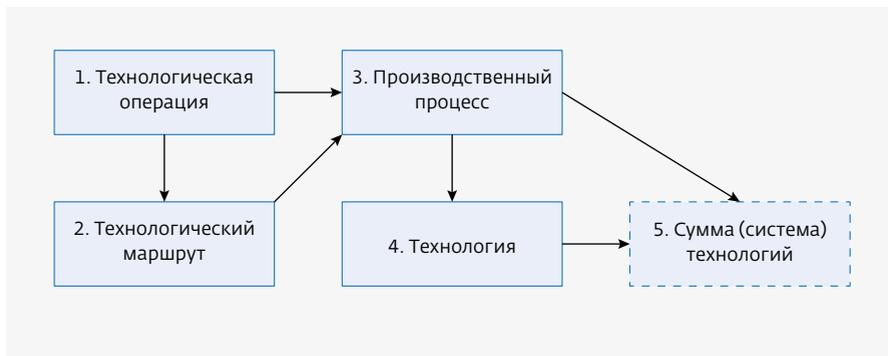


Рис. 1. Взаимосвязь уровней описания технологии. Стрелка направлена от предшествующего по иерархии понятия к производному

понимаем совокупность распределенных во времени и по единицам оборудования ТМ, ведущих к созданию конечных изделий (из заданного списка), профилактических ТО, возвращающих оборудованию его рабочие качества, контрольных и аттестационных ТО, уточняющих внутреннюю информацию. Заметим, что наше понимание ПП тождественно пониманию ПП со стороны экономистов, которые включают в ПП технологический процесс (в инженерном смысле). Например, производство на предприятии микроэлектроники. Определим «технология» как развивающуюся совокупность: всех ТМ, реализующих процесс перехода множества состояний субстратов во множество изделий, характеризующихся общностью принципов устройства и назначения; материальных условий осуществления этих ТМ; законов изменения множества ТМ во времени с использованием их показателей качества и производимых НИОКР. Например, технология СБИС, как она существует в мире в целом, некая интегративная величина от ПП микроэлектроники. Под «системой технологий» (СТ) будем понимать такую сеть технологий, при которой каждый элемент входа-выхода одной технологии тождественно равен какому-либо элементу выхода-входа другой технологии. Например, все технологии в области техники, образующие технологический уклад (опять же, в мире в целом).

Если кратко, ТО – элементарный (минимальный) акт преобразования; ТМ – цепочка ТО, приводящая к появлению изделия/продукции (ноу-хау); ПП – локализованная в пространстве – времени (в пределах единой структуры) связка ТМ (деятельность предприятия); Т – объект, интегрально характеризующий все ПП, выпускающих однотипную продукцию (отрасль промышленности); СТ – экономика страны или мира, отражающая степень развитости цивилизации. Более точные и абстрактные, учитыва-

ющие естественные технологии, определения будут даны в следующих частях.

Поскольку технология есть сложный объект, то задачи ОТТ требуют разделения точек зрения, выделения нескольких аспектов исследования. В большинстве из них в той или иной мере присутствует процессно-динамический аспект. Математическое моделирование уровней 4,5 находится сейчас еще в зачаточном состоянии в отличие от уровней 1, 2, возможно, 3 (см. табл. 1).

Основная задача ОТТ состоит в выявлении общих закономерностей, проявляющихся на каждом из уровней описания частных технологий. Чтобы идентифицировать частные задачи какой-то технологии как принадлежащие какому-то уровню и аспекту, необходимо в первую очередь понять, а какое изделие/продукция генерируется данной технологией? Это могут быть кремниевые чипы в корпусе, молекулы АТФ, компетенции, врачебный диагноз и прочее в технологиях разного типа. Второе требование состоит в том, чтобы данное изделие производилось некоторой замкнутой (пространственно и/или юридически; например, разработка программного обеспечения или дизайнерских проектов СБИС может происходить удаленно, но в рамках одного коллектива), единой структурой. Например, технология производства кремниевых пластин не входит в технологию микроэлектроники, так как производство пластин удалено от производства чипов, но операция эпитаксии слоев – одна из первых в ТМ СБИС – принадлежит, вообще говоря, обеим технологиям. Развитие рынка операционных услуг в микроэлектронике – поскольку дешевле арендовать оборудование, чем его купить – несколько размывает это требование.

Вот примеры некоторых задач, взятые в основном из области микроэлектроники с комментариями к ним (шифр означает <группа аспектов> – <номер уровня>) (см. табл. 1):

**ПО-1:** Предложить наиболее экономичный технологический режим для автоэпитаксии высокоомного кремниевого слоя с заданными параметрами дихлорсилановым методом, проводимым с одной пластиной? /Технологический режим в такой задаче целесообразно понимать в узком смысле количественных характеристик циклограммы  $(p, T) = f(t)$  «зависимость парциального давления и температуры от времени», изменение кото-

Таблица 1. Объект-предметная схема исследования технологии

Аспект	Название уровня					Средство формализации
	ТО(1)	ТМ(2)	ПП(3)	Т(4)	СТ(5)	
Процессно-динамический (П)	++	+	+	+	+	Дифференциальные уравнения (в т.ч. в частных производных)
Структурный (С)	+	++	-	-	+	Теория нормальных алгорифмов*
Оптимизационный (О)	++	+	++	+	-	1. Вариационное исчисление 2. Теория игр
Вероятностно-статистический (В)	+	++	+	-	++	1. Теория вероятностей 2. Математическая статистика
Диспетчерский (Д)	-	-	++	-	+	Теория расписаний и массового обслуживания
Эволюционный (Э)	-	-	+	+	++	Графы, теория бифуркаций
Информационный (И)	+	+	+	+	++	Теория информации

Примечание: + – уровень допускает аспект; ++ – аспект существенен для уровня; \* – теория нормальных алгорифмов Маркова формализует также П-аспект в части качественных изменений.

рых в некотором диапазоне не приводит к качественному результату ТО. Задача решалась в [1]./

**ПВ-1:** Для данного технологического режима найти разброс значений толщины эпитаксиального слоя по длине реактора.

**ПВО-1:** Для данного технологического режима найти оптимальное значение угла наклона пирамиды пьедестала, при которой достигается наилучшая воспроизводимость параметров эпитаксиального слоя.

**ПС-2:** Определить, не приведет ли запланированная в ТМ операция термического окисления к смыканию ранее сделанных  $p^+$  и  $r^+$ -карманов? /Типичная задача, с которой сталкивается технолог. После каждой ТО, входящей в ТМ, нужно иметь описанную структуру субстрата, в противном случае легко упустить из виду саму постановку такой задачи./

**ПС-2:** Какие приборы можно создать, имея в наличии следующие оборудование и материалы? /На языке нормальных алгорифмов: во что переведет данная схема алгорифма каждое слово с фиксированной подпоследовательностью букв? Задача актуальна для эффективной предпринимательской

деятельности, ее можно отнести к уровню ПП также, но лишь когда ставится задача прибыльности, возможности закупки нового оборудования, а не технологической осуществимости. Поэтому задача принадлежит второму уровню./

**ПСВ-2:** Чему равен прогнозируемый процент выхода годных изделий для приборов с зарядовой связью (ПЗС), проходящих данный ТМ на данном оборудовании? /Простейший путь – перемножение соответствующих вероятностей для ТО. Однако нетривиальность задачи заключается в необходимости знания структуры прибора (узких мест) для поиска «мишеней» возможного брака./

**СИ-2:** В каких местах ТМ следует включать специальные контрольные (метрологические) операции? /Они должны быть расставлены так, чтобы обеспечить нас наибольшей информацией о ТМ. Кстати, в микроэлектронике используют специальные пластины-спутники и делают тестовые ячейки для облегчения решения СИ-задач./

**ПВО-3:** Какое дополнительное оборудование следует приобрести на ограниченные средства, чтобы минимизировать потери (в виде упущенной выгоды) при аварии (выходе из строя каких-

либо единиц оборудования)? Известен более простой вариант о риске невыполнения ряда заказов при срыве поставок деталей./

**ПО-3:** Целесообразно ли выпускать ПЗС на предприятии, то есть превышают ли суммарные издержки за первые три года последующую прибыль за 5 лет? /Подобного сорта задачи популярны при анализе инвестиционных проектов./

**ВД-3:** Для ряда изделий резко упал процент выхода годных. Выяснить, виновато ли в этом плохое качество хлорводорода, дефект установки для фотолитографии или иное, например, человеческий фактор? /Актуальная задача в условиях несоблюдения технологической дисциплины./

**ПДВ-3:** Как следует организовать прохождение партий пластин по их ТМ, профилактические и контрольные ТО в случае устаревающего оборудования, чтобы выход годных для каждой партии не снижался ниже 95%, а поступление партий пластин на склад было равномерным во времени? /Ставится одна из типовых задач теории расписаний, осложненная фактором устаревания оборудования./

**ПОИ-4:** Прибыльно ли вкладывать средства в разработку новой конструкции эпитаксиального реактора для индивидуальной обработки пластин? /Формулировка сходна с примером ПО-3, но, во-первых, речь идет не о готовом изделии, а об оборудовании, которое способствует технологической реализации многих проектов; во-вторых, задача стоит перед отраслью в целом. Стоит ли государству и/или коммерческому предприятию финансировать такую разработку?/

**ПИ-5:** Насколько повысится эффективность экономики страны (рассчитываемая как усредненный процент выхода годных по отраслям промышленности) при внедрении более совершенных средств измерения, основанных на применении ЭВМ?

**Э-5:** Вытеснит ли метро наземный транспорт в мегаполисах?

Предлагаемая пятиуровневая схема базируется на зачастую анонимных, попытках отечественных авторов 60-х годов (ранняя из которых датируется 1938 г.) формализовать технологию. Так, например, наши определения ТО и ТМ выглядят вполне стандартными (иногда включается промежуточное понятие «технологическая цепочка», подразумевающая ТО в пределах одного цеха). Однако эти определения возможно и необходимо расширить для любых технологий, а не только в области техники. Поэтому вернемся к библиографии вновь, остановившись на сути ключевых публикаций по ОТГ.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПО С. ЛЕМУ

Книга начинается с уведомления – «нам предстоит разговор о будущем», она проникнута духом удивления перед двумя эволюциями, длительной биологической и стремительной технической. Футуристически прогнозируется синтез этих технологий на базе представлений о гомеостазе, естественном отборе, обратных связях, фигуре некоего Конструктора. К биологии С. Лем подходит технологически: «Какой же технолог устоит перед этим искушением? Из двадцати аминокислотных букв Природа построила язык «в чистом виде», на котором выражаются – при ничтожной перестановке нуклеотидных слогов – фаги, вирусы, бактерии, а также тиранозавры, термиты, колибри, леса и народы, если только в распоряжении имеется достаточно времени». С точки зрения воображаемого Конструктора указываются неоптимальности, условные дефекты в таком технологическом изделии, как «тело человека»; в том смысле, что если не слепая эволюция, а разумное существо проектировало бы человека, то оно сделало бы лучше (однако в книге в целом подчеркивается схожесть приемов обоих Конструкторов).

По Лему, технологии – это обусловленные состоянием знаний и общественной эффективностью способы достижения целей, поставленных обществом, в том числе и таких, которые никто, приступая к делу, не имел в виду. Последнюю часть он поясняет примером: искали философский камень, а нашли фарфор. Относительно близкий к нашему времени пример о случайности в науке и технике – открытие фуллеренов.

Всякая технология рассматривается как инструмент человека в борьбе за существование. Но и между технологиями она тоже идет: «...иначе обстоит дело с управляемым воздушным шаром, который перед лицом угрозы со стороны машин тяжелее воздуха обнаружил гигантизм, столь типичный для предсмертного расцвета вымирающих эволюционных ветвей. Последние цеппелины 30-х годов нашего [XX.- Прим. авт.] века можно смело сопоставить с атлантозаврами и бронтозаврами мелового периода. Огромных размеров достигли также последние типы паровозов – накануне их вытеснения дизельной и электрической тягой». Война – это лишь ускоряющий, но не инициирующий фактор НТП; при том что существует тенденция к новациям двойного (военного и гражданского) применения.

Этим, по-видимому, исчерпывается технологическое содержание работы, поскольку большая часть посвящена искусственному интеллекту и новоязу (пантокреатика, фантомология и пр.). На наш взгляд,

вопросы включения в технологию, допустим, микроэлектроники разного рода обратных связей (с тем, чтобы параметры технологической операции в каждом конкретном случае подгонялись под измеренное ранее состояние субстрата) могут представлять интерес, хотя, конечно, сдерживает трудоемкость сбора информации и юстировки оборудования.

## ТЕХНОЛОГИЯ И МЕГАМАШИНА ПО Л. МАМФОРДУ

Основной посыл Льюиса Мамфорда – не допустить, чтобы человек стал «винтиком» какой-либо социальной машины (а к тому развитие технологии объективно толкает человека). Уже в Прологе написано: «господствующее меньшинство создаст некую единообразную, всеохватную и выходящую за пределы Земли структуру, предназначенную для автоматической работы. Вместо того чтобы активно функционировать в качестве самостоятельной личности, человек станет пассивным, бесполезным и машиноуправляемым животным, – и если верить современным интерпретациям роли человека со стороны технократов, присущие ему функции окажутся либо поглощены машиной, либо строго ограничены и подвергнуты контролю в пользу обезличенных коллективных организаций».

Способность изготавливать орудия труда отнюдь не решающее отличие человека от животного, в качестве которого автор видит направление излишков времени и умственной энергии на «культурную работу» (мифы, ритуалы, теории, язык, бесполезная игра – с отсылкой к homo ludens Хейзинги). Человек, прежде всего, является животным, творящим собственный разум, обуздывающим себя и самопрограммирующим. «В древнегреческом термине τεχνη не выражено различие между промышленным производством и «изящным» или символическим искусством; и на протяжении значительной части человеческой истории оба аспекта этого термина были неотделимы друг от друга, причем один из них отвечал объективным условиям и функциям, а другой – субъективным потребностям».

Далее Мамфорд де факто описывает социальные технологии: «Ни телега с колесами, ни плуг, ни гончарный круг, ни военная колесница сами по себе не могли способствовать мощным преобразованиям, случившимся в долинах великих рек Египта, Месопотамии и Индии... корни того, что экономисты в недавние эпохи называли «веком машин» или «веком электричества», относятся не к так называемой промышленной революции XVIII столетия, но к имевшей место в период возникновения цивилиза-

ции организации первичной (archetypal) машины, составленной из человеческих деталей... По сравнению с ранними формами ритуализованного порядка, этот механизированный порядок был навязан человеку извне... тяжелые социальные дефекты человеческой машины были частично компенсированы ее превосходными достижениями в регулировании разливов рек и выращивании зерновых». Собственно говоря, вот и описание Мегамашины; впрочем, в истории было несколько Мегамашин, иногда они ломались, иногда возрождались на новой почве. Мамфорд акцентирует внимание на том, что на высшем пике развития Мегамашина ассоциировалась с войной, разрушением и террором, направленными вовне.

Мамфорд подмечает одну из существенных черт технологии, заключающуюся в унификации и стандартизации: «Стандартизация стала отличительной чертой нового царского хозяйства практически повсеместно. Конфуций, говоря о гораздо более раннем достижении этой культуры, заметил: «Теперь во всей империи повозки имеют колеса одинаковой величины, все записи делаются одинаковыми знаками, и правила поведения тоже везде одинаковы». Для Мамфорда стандартизация – это одно из проявлений потребности в упорядочивании и действительного наведения порядка, которое он связывает с астрономическими записями древних и полагает одним из первых признаков становления Мегамашины.

Бюрократию Мамфорд воспринимает сугубо отрицательно. «Неотъемлемой частью мегамашины служила хорошо организованная бюрократия, то есть, группа людей, способных передавать и выполнять приказания с ритуалистичной педантичностью жреца и бездумным послушанием солдата. Вообразить, будто бюрократия сравнительно недавнее изобретение, – значит, пренебрегать анналами древней истории... Мы обязаны [фараону] Джосеру... созданием нового чудовища – бюрократии».

Тогда становится понятным, насколько Мегамашина невосприимчива к НТП; Мамфорд пишет: «Первые эффективные экономящие труд машины возникли не в технически передовых центрах империи, но среди варварских народов, живших на ее окраинах и никогда полностью не подпадавших под очарование священных мифов о божественной царской власти». Использование ветряных и водяных мельниц в Европе Мамфорд увязывает с монастырями бенедиктинцев. Для формирования современной Мегамашины Мамфорд считает ключевыми изобретения, сделанные между XII и XVI веками: мельницы,

увеличительное стекло, печатный станок и механические часы.

## ЕСТЕСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АКАД. УГОЛЕВА

Отправной точкой служит физиология как:

- учение о явлениях живой природы;
- как наука, промежуточная между биохимией, биофизикой и др.;
- наука о структуре биологических процессов независимо от природы их носителя (физического, химического или механического);
- технология биосистем.

Мы имеем емкую формулу-определение: «В свете этого общее представление о технологии превращается в науку о принципах, структуре и динамике организованных процессов... жизнь – это совокупность естественных технологий». Затем формула уточняется: «Организованный процесс характеризуется определенной программой, структурой, осуществляющей данный процесс, и управляющей системой, реализующей контроль и регулирование деятельности системы. Он идет с затратой энергии и в большинстве случаев обладает некоторым эффектом». Естественная технология – это наука об организованных биологических процессах.

Дается следующая классификация взаимодействующих технологий:

- производственные технологии, связанные с закономерностью процессов производства;
- биотехнологии, в которых живые системы используются в качестве звеньев, реализующих производственные процессы;
- естественные технологии, возникшие в ходе эволюции, которые являются характеристикой живых систем и отражают наиболее важные особенности их существования и эволюции;
- синтетические технологии, или синтехнологии, в которых сочетаются производственные и естественные технологии.

Большая часть книги посвящена физиологии пищеварения, а также особенностям эволюции пищеварительной системы у разных организмов. Затем дается некий обобщающий раздел под названием «Универсальные функциональные блоки». Как пишет автор, «потребовались многократные повторения фактов для того, чтобы принцип организации сложных биологических систем на основе комбинирования ограниченного числа универсальных функциональных блоков перестал мне казаться противоречащим неисчерпаемому многообразию живых систем и их индивидуальной и эволюционной адап-

тивности. Более того, при построении взаимодействующих различными способами биологических систем лишь блочная организация дает им возможность существовать длительное время. Следует иметь в виду, что принцип блочности основан на экспериментальных данных, а не на чисто теоретических предположениях». Концепцию раскрывают следующие тезисы.

- Различные функции, в том числе специализированные, выполняемые клетками различных тканей и органов высших организмов, складываются из элементарных функций, реализуемых определенными комбинациями ограниченного числа функциональных блоков – молекул или надмолекулярных комплексов. Эти стандартные блоки, сочетаясь между собой и распределяясь в разных количественных соотношениях и в разных отделах клеток и органов, обеспечивают их специализацию.
- Эволюция одноименных структур связана с перераспределением функциональных блоков, которые близки или идентичны у организмов, стоящих на разных уровнях эволюционной лестницы.
- Изменения функциональных эффектов клеток и органов также связаны с перераспределением функциональных блоков.

Приведем еще характерную цитату: «Один из путей эволюции – объединение функциональных блоков в уникальные по своим свойствам ансамбли, примером которых могут служить транспортные АТФазы. Однако до сих пор неясно, какие функции выполняли блоки, ставшие обязательными компонентами этих сложных молекулярных машин. Другой впечатляющий пример роли сочетаний функциональных блоков представляет собой система, осуществляющая цикл Кребса. Компоненты этой системы возникли в анаэробный период, хотя вся система в целом является наиболее эффективным инструментом использования кислорода». Еще одна цитата: «Так, осморегуляторная система, поддерживающая постоянство солевого состава внутренней среды организмов, и секреторные органы, участвующие в процессах пищеварения, состоят из одних и тех же функциональных блоков». Работа с ограниченным числом блоков обеспечивает более устойчивую регуляцию и более быстрые перестройки. Поиск нужных деталей и сборка машин из стандартных деталей являются, по-видимому, более простым актом при реализации естественных технологий.

Перейдя от уровня функциональных блоков к вышестоящему, Уголев раскрывает принципы мультифункциональности (способность выполнять

несколько функций) и мультипотентности (способность к дальнейшей дифференциации).

### ТЕХНОЛОГИИ ПО Д. САХАЛУ

В нынешней традиции Сахала считают теоретиком и исследователем НТП (в частности, поставившим вопрос о переносе/диффузии технологий как во времени, так и в пространстве), что, конечно, справедливо, но в структуре книги видна амбициозная цель автора, о чем он сразу недвусмысленно заявляет: «Предпринимается попытка заложить основы науки о технологиях как самостоятельной теоретической дисциплины». В течение почти семи лет исследований Сахал проанализировал массу литературы экономико-статистического характера, сам не занимаясь статистикой, свел в единый массив ряд корреляций и, самое главное, сделал выводы о характере НТП. Пример такой корреляции: на основании временных рядов для самолетов 1932–1953 годов дается конкретная линейная формула  $y = ax + b$ , где  $x$  – средний объем пассажирского салона,  $y$  – средняя скорость полета. Проводя аналогии с простыми физическими законами, (иногда) описывающими сложные системы, Сахал скептически оценивает роль статистики: «Стандартные статистические методы ограниченно применимы для проверки законоподобных соотношений... законоподобные соотношения отнюдь не обязательно должны быть причинными зависимостями». Далее, по Сахалу, «процесс технологических сдвигов не является ни вполне хаотическим, ни вполне управляемым». Истоком потока нарастающих технологических новшеств становится обучение в процессе создания, испытания и использования тех или иных систем.

Сахал выделяет три трактовки понятия «технология», сложившиеся у современников. Первая, неоклассическая, связана с существованием производственной функции, которая выражает не тривиальный выпуск продукции, а его связь со всеми технологически доступными факторами производства (например, капиталом и трудом). Технологические нововведения, и здесь Сахал ссылается на Шумпетера, меняют пропорцию факторов, необходимых для заданного выпуска (обобщая: меняют форму математического выражения производственной функции). И соответственно, если мы правильно понимаем Сахала, технология – это способ комбинирования факторов производства. При этом сам автор указывает на недостаток такого подхода – «понятие производственной функции... не содержит, как таковое, понятие технологии». Вторую трактовку

Сахал называет «пифагорейской», идея которой состоит в использовании статистики патентов изобретений и хронологии важнейших изобретений для оценки НТП. И сразу автор выявляет недостаток: не все изобретения патентуются, не все патенты внедряются в производство. Отдельная инновация есть непрерывный процесс, не всегда поддающийся дискретному описанию. И также часто революционные инновации не являются результатом накопления мелких инноваций. Статистика патентов и хронология открытий описывают лишь возникновение, а не развитие технологии. К третьей, функциональной, трактовке, по Сахалу, пришли независимо друг от друга экономисты и специалисты по ОТС, а ее идея состоит в том, что технология определяется ее функционированием, например: «...вытекает вывод о необходимости рассмотрения показателей типа эффективности расхода топлива некоторым техническим устройством в качестве меры, характеризующей состояние технологии». Автор является сторонником функциональной трактовки и приводит дополнительный аргумент в ее пользу – три четверти НИОКР направлены на изменение характеристик продукта.

Тезис о науке как основном двигателе технологических сдвигов встречается у Сахала прохладное отношение; некоторые факты, приводимые автором, говорят не в пользу тезиса (технология подчас опережает научные теории).

Как ни удивительно, Сахал уклонился от прямых определений технологии типа «технология – это...», однако это не помешало ему сформулировать «общие принципы эволюции технологий».

### ОТТ ПО РОМАНЕНКО И НИКИТИНОЙ

Авторы творчески переработали ряд источников, включая некоторые указанные выше в Библиографии. Зародыш ОТТ они видят в трудах Менделеева по (химической) технологии (1901), а в качестве метода предлагают разработанную ими же теорию многообразий (не путать с одноименным математическим объектом), некую версию диатропики.

Вначале формулируются общеметодологические постулаты исследования в ОТТ:

- независимость объекта от субъекта, то есть наши исследования технологии никак не влияют на саму технологию (на самом деле постулат отнюдь не естественный, поскольку те экономические взгляды, которых придерживаются члены правительства, непосредственно влияют на проводимую государством политику и, следовательно, на существующие в стране НИОКР, технологии);

- описания свойств преобразуемых объектов и процессов, на них воздействующих, независимы, что следует из предположения о стабильности объекта вне технологических процессов;
- отклонением объектов и процессов от идеальной идентичности можно пренебречь, а когда этого сделать нельзя, можно использовать стандартные методы математической статистики (требование воспроизводимости, отсутствия неконтролируемых факторов);
- воздействие на технологию многих факторов представимо линейной комбинацией, то есть факторы действуют независимо. Последнее допущение, на наш взгляд, излишнее.

Авторы ставят вопрос о задачах, решаемых ОТТ: «Одним из основных результатов общего анализа должна быть классификация всех принципиально возможных технологий. Создание на этой базе классификаторов и справочников типовых технологий представляет несомненную пользу для задач автоматизированного проектирования, поиска принципиально новых технологических решений и автоматизированного синтеза сложных технологических процессов на базе более простых». Дается цепочка понятий: «процесс», «эволюционный (медленный) vs динамический (быстрый) процесс» и «технология». Для технологии дается три определения:

- технология – это направленное воздействие на группу сущностей (объектов), которое переводит их в иное состояние;
- технология – это такое направленное воздействие на сущности, которое опирается на сумму накопленных человечеством знаний. Из этого следует, что технология суть применение научного знания к управлению окружением человечества и управлению его внутренними состояниями и связями;
- технологией можно считать алгоритм любой деятельности, обеспечивающей достижение запланированного результата.

Авторы приводят среди прочих четвертое, заимствованное: «Технология – это процесс, в котором результаты совпадают с поставленной целью и в котором все внешние воздействия четко регламентируются. Если четкой регламентации нет, а результат начинает неожиданно получаться, то это означает, что мы имеем дело с искусством, понимаемым в производственном смысле».

По Романенко и Никитиной, «все технологии можно разбить на четыре группы. Первая из них – технологии, искусственно созданные человеком для работы в производственных условиях. Их называют производственными технологиями. Вторая

группа – технологии, возникшие в живой природе как следствие биологической эволюции. Их называют естественными технологиями. Третья группа – технологии, представляющие собой разнообразные сочетания естественных и производственных технологий, естественных природных процессов не технологического характера и гуманитарной составляющей. Их называют комбинированными технологиями. Наконец, четвертая группа технологий – созданные человеком технологии, которые работают в гуманитарной сфере. При желании технологии первой и четвертой групп можно рассматривать как большую, сложную группу искусственно созданных или же технических технологий. Это деление на группы является исчерпывающим в том смысле, что любая вновь предложенная или вновь найденная технология с необходимостью относится к одной из четырех перечисленных групп».

И далее, «Процессы (действия, операции), из которых состоят искусственные технологии – это технологические процессы. Различные устройства: аппараты, машины, транспортирующие элементы и т.д., составляющие техническую сторону естественных технологий, – это технологическое оборудование. Наконец, запись последовательности операций (алгоритм действий) – это технологический регламент. В совокупности эти три составляющие представляют собой искусственные технологии».

Вводится технологическая триада: исходный объект, технология, конечный объект – ее члены (по уточнению авторов – фасеты) независимы, так как «один и тот же конечный объект может быть получен из разных исходных объектов и путем разных технологий. Одна и та же технология может быть использована для преобразования различных исходных объектов в различные же конечные объекты».

Заметим, что сформулированная нами иерархия уровней описания технологии не совсем совпадает с иерархией по Романенко и Никитиной, где предлагается более простой принцип вложенности: «Большинство практических технологий состоит из более простых технологий. Все они имеют триадную форму, и по отношению к конечной технологии можно говорить о том, что она является вершиной иерархии технологий более низкого уровня». При функциональном подходе к технологии используется аппарат операций Р. Коллера.

Важным для авторов является понятие «технологический поток», то есть «перемещение в пространстве и/или времени любой сущности, которая участвует в технологическом преобразовании». Технологические потоки делятся на две группы:

- внутренние потоки (они действуют внутри технической системы, обеспечивающей реализацию технологии);
- внешние потоки.

Они обеспечивают связь обобщенного технологического пространства с внешним миром. В соответствии с временным характером технологические потоки и определяемые ими технологии могут быть непрерывными, периодическими (циклическими), квазинепрерывными, случайными (аперiodическими), пульсирующими и разовыми. Помимо трех классических потоков (вещества, энергии, информации) выделяются денежные и товарные потоки. Авторы возвращаются к сравнению ТТС и ОТТ: «В теории технических систем изучается только наличие и направление трех основных технологических потоков. Характер их преобразования обычно не рассматривается. В теории же технологий важны не только указанные выше характеристики потоков, но и характер их образования, то есть те законы, которые определяют и регулируют поведение различных потоков в конкретной технологии». Понятие потока может использоваться как классификационное. На примере ТТС авторы воспроизводят классификацию Р. Коллера:

- машины – технические системы, которые главным образом используют потоки энергии и их преобразования;
- приборы – технические системы, которые главным образом используют потоки информации и их преобразования;
- аппараты – технические системы, которые главным образом используют потоки и превращения веществ.

Среди многочисленных утверждений, высказанных в книге, выделим еще одно, свидетельствующее о понимании авторами взаимодействия искусственных, естественных, гуманитарных технологий в биосфере: «Любая цепочка последовательных технологий всегда заканчивается порождением отходов (отбросов). Практический вопрос сводится к тому, чтобы количественно эти отходы были минимальны, по возможности безвредны в экологическом смысле». Для технологии микроэлектроники важность этих вопросов очевидна, но вот, например, если рассуждать в рамках технологии научной деятельности, где «изделием» выступает научная статья – такая, как эта – отходами будут обрывочные html-файлы, надерганные из Интернета на рабочий компьютер. Интересен еще один вывод, касающийся НТП: «По мере развития технологий и роста продукции возрастают

требования к разнообразию решений. Иными словами, получение большого однообразного технологического поля в принципе невозможно. Как следствие этого – возникновение напряжений на границах кластеров или страт, на которые распадается единое технологическое пространство. Эти соображения очень важны при исследовании технологической социальной сферы».

Книгу Романенко и Никитиной завершают семь правил-тезисов, фиксирующих «сухой остаток» их ОТТ.

## ФИЛОСОФИЯ ТЕХНИКИ И ФИЛОСОФИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Философия техники как раздел философии насчитывает не более 150 лет, но по ней уже написан ряд учебников. Что же касается философии технологии, то словосочетание *philosophy of technology* появилось лишь в ранних 90-х годах XX века, и пока выйдут лишь все более толстые антологии работ на эту тему. Как связаны между собой техника и технология? Первая точка соприкосновения очевидна: любая техническая система (иначе: искусственно созданный объект) является конечным продуктом какой-либо или каких-либо технологий. Покупая, например, набор цветных карандашей в магазине мы вряд ли задумываемся, какие ухищрения для разработки химических красителей, механической обработки древесины и конденсации графита понадобились для изготовления каждого такого замечательного карандаша (включая и упаковку, куда они завернуты). Мы видим лишь вершину айсберга, говоря только о технике, но забывая о технологиях. Вторая точка соприкосновения состоит в том, что любая технология реализуется с помощью техники. Можно вспомнить отрасль приборостроения, можно вспомнить более скромный пример: доска и мел (или те же карандаши-маркеры) в устаревших образовательных технологиях.

По естественным причинам обе сферы часто смешиваются, так как, говоря о технике, нельзя не сказать о технологии, и наоборот. Поэтому в учебниках по ТТС неизменно присутствует глава по «созданию технических систем». Если философия техники, например, рассуждает о том, как какая-либо новая вещь (условно: самолет) расширяет наши функциональные возможности, то философия технологии должна рассуждать о том, как потребности технологии (условно: самолетостроения) расширяют наши трудовые и деятельностные навыки, «экономические ниши». В этой связи можно привести пример, как потребность считывания штрихкодов и RFID-меток

положительно повлияла на занятость в секторе отечественной микроэлектроники.

В работах [53–55], прежде всего Джованни Доси, обсуждаются понятия *technological paradigm & trajectory*. Следуя [54], «по отдаленной аналогии с определением Куна научной парадигмы мы определим технологическую парадигму как модель или паттерн решения избранных технологических проблем, основанных на избранных принципах, выведенных из естествознания, и на избранных материальных технологиях... Как «нормальная наука» представляется актуализацией научной парадигмы, так и НТП детерминирован внутри конкретной технологической парадигмы». Слово «избранных» трижды выделено Доси. Технологическую траекторию Доси описывает как непрерывное движение/развитие технологий при заданной технологической парадигме, которое прерывается при смене парадигмы (аналогично революциям по Куну).

Технологии, как оказывается, имеют и морально-этическое и юридическое измерения. Так, в [56] выделяется три типа проблем:

- применение устаревших юридических категорий к технологиям нового типа;
- недостаточно критический подход к технологиям, так называемое ослепление технологиями, которые своим появлением производят глубокое впечатление;
- невозможность предсказать некоторые новые законы.

Один из примеров (для второго пункта) – вскоре после появления технологии опознавания преступника по найденным отпечаткам пальцев в суде говорили человека, исходя лишь из показаний экспертов. Определенные люди сравнивали отпечатки, найденные на месте преступления, с отпечатками подсудимого. Никаких научных экспертиз проведено не было, мнение основывалось на том, что уже ранее находили преступников аналогичным методом, а, значит, он работает [56].

Наконец, обратим внимание на работу [57] Андре Феенберга, где критикуются взгляды Маркса и Маркузе и развивается так называемая *critical theory of technology*. Краткое изложение идей (1991) дано позже самим Феенбергом в [58] на основе концепции инструментализма. Оспаривается тезис об этической нейтральности технологии, вводится понятие технического кода. По Феенбергу, технология неотделима от социально-политической системы и не может рассматриваться как самодостаточная вещь. Пример: повышенное требование общества к личной безопасности понуждает применять подушки безопас-

ности в транспорте и изобретать технологию изготовления таких подушек. Технологии сегодня определяют наш образ жизни, общественные ценности включены в процесс производства. Феенберг сравнивает технологии с законами и обычаями, которые присваивают себе определенные измерения человеческой жизни. В чем-то Феенберг возвращает нас к интенциям Мамфорда, хотя и с более «философским» оттенком.

Большую известность приобрел технологический императив (*imperative*) и соответственно его критика [59–60]. В краткой форме: «Если можно что-то произвести, сделай это (или это сделают другие)». Или, «во все времена технология торжествовала», «НТП есть безусловное благо». Идея технологического императива восходит к Дж. Фон Нейману, а наиболее ранняя формулировка [60] принадлежит первому директору Римского клуба Хасану Озбекану (1968) – «While we can do something (it is technically possible) then this action either ought to (as a moral imperative), must (as an operational requirement) or inevitably will (in time)».

Стоит также упомянуть активно обсуждаемый вопрос технологической сингулярности (*singularity*), навеянную ускоренными темпами НТП по сравнению с периодом смены поколения (часто в демографии принимается за 25 лет) [61–62]. Вопрос во многом спекулятивный, футурологический и относимый приблизительно к 2030 году. В исходной формулировке писателя Вернора Винджа изобретение искусственного интеллекта станет фактором, который сделает НТП неуправляемым и чреватым опасными для человечества последствиями после достижения точки сингулярности (если НТП изображать гиперболой). В более мягкой формулировке время наступления сингулярности и фактор не определены, а эсхатологические ожидания выглядят менее алармистскими. Заметим, что в научной практике не бывает ничего бесконечного, и сингулярность лишь абстракция.

## ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Если технология, по нашему краткому определению, есть «овеществленный алгоритм(ы)», то это означает, что семантическое ядро этого понятия лежит возле уровня ТМ (и потому, например, любая формализация фундаментального математического понятия «алгоритм» априори будет уместной для описания ТМ). Иными словами, любая версия ОТТ должна строиться вокруг понятия «алгоритм», а не только, как в ТТС, вокруг понятия «преобразование». Но ТМ, очевидно, больше, чем алгоритм. Во-первых, реализованный в жизни ТМ опирается и является следствием

**массовости** своего применения (отсюда естественный отбор алгоритмов по свойству эффективности, которая складывается из функциональности изделия и оптимальности потребления ресурсов). Иными словами, если к достижению цели ведет несколько технологий (ТМ), то на практике будет выбрана наиболее экономичная. Во-вторых, ТМ должен обладать свойством **воспроизводимости** (reliability), то есть при неточном воздействии на субстрат с разбросом начальных параметров изделие не должно сильно уклоняться от идеального. Можно провести аналогию с вычислительной математикой: алгоритм (численная схема) должен быть устойчив (к ошибкам начальных данных и погрешности округления на каждой итерации). В-третьих, часто ТМ или ТО обладает **групповым свойством**, то есть алгоритм осуществляется одновременно над несколькими субстратами (в микроэлектронике – партия пластин, в педагогике – группа слушателей, в биологии – длинные и короткие углеводы в пище), что позволяет существенно снижать затраты (материалов, энергии, времени), но за счет снижения воспроизводимости. Значительный вклад в теорию и практику организации производства внес проф. кафедры технологии приборостроения ИТМО С.П. Митрофанов, разработавший в 70-е годы XX века научные принципы групповых методов обработки деталей [63]. Тривиальная разница расположения пластин по граням эпитаксиального реактора приводит к отклонениям концентрации газов над пластинами, следовательно, отклонениям скорости роста и, следовательно, разбросу толщины финального слоя. С развитием нанотехнологий и ужесточением требований по воспроизводимости выбор реактора индивидуальной или коллективной обработки пластин уже неоднозначен (в пользу второго варианта), как ранее.

О многоуровневости технологии мы писали давно [5–6]: «Следовательно, модель такого объекта, как «промышленная субмикронная технология» должна быть многоуровневой. На самом верхнем уровне моделируется общая структура объекта, его состав и взаимосвязи между отдельными составляющими. То есть модель промышленной субмикронной технологии рассматривается нами как система технологических операторов, характеризующих процессы, входящие в эту систему. Модели процессов представляются в виде соответствующих графов, которые в свою очередь определяют состав и последовательность фаз, этапов, операций, рабочих переходов и проч. в данной системе. Модель верхнего уровня представляет собой разветвленный граф... Основными элементами (крупными «вет-

вями») графа являются: технология и оборудование, условия производства, планирование производства, финансовое планирование и маркетинг. Каждая из этих крупных ветвей представляется своей собственной графовой моделью более низкого уровня. При этом графы взаимосвязи операций моделей нижнего уровня являются результатом развертки графа взаимосвязи операций верхнего уровня».

Коснемся различия между технологическим и производственным процессами. Такое определение ПП давалось нами ранее [6]: «Промышленная технология микроэлектроники современного субмикронного уровня – это система, включающая в себя комплекс технологических операций, оборудование, условия производства, комплекс методов и средств моделирования, проектирования, диагностики и контроля, управление и персонал. Эта система работает в полном взаимодействии с внешней средой. Условием существования этой системы является превышение денежных доходов над расходами». Согласно [27, 51], «технологический процесс – часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и/или определению состояния предмета труда. Под изменением состояния понимают изменение формы, размеров, физических свойств и т.п. К предметам труда относятся заготовки и изделия».

Что касается классификации технологий, то первым классификационным признаком мы считаем сферу приложения, и тогда выделяются:

- естественные технологии (в т.ч. все биологическое в воспроизводстве человека);
- технические (материальные) технологии, где основной результат в преобразовании вещества или энергии (включая и биотехнологии, сельское хозяйство и пр., содержащее живые компоненты в ТО);
- информационные технологии, где основным результатом является новая информация или знание (включая проектные, банковские, медицинско-диагностические и, разумеется, компьютерные);
- социальные технологии, где основным результатом является преобразование человека (образование, повышение квалификации, культурно-воспитательные и т.д., также и массмедийные, политические и, разумеется, когнитивные).

Специфика информационных технологий заключается в их присоединенности к технологиям остальных трех типов. Позже мы вернемся к вопросам классификации более детально.

Все четыре типа технологий (рис. 2) вместе образуют систему взаимодействующих технологий, в центре которой стоит человек, поскольку участвует в них (как работник), потребляет их продукт (как потребитель) и иногда формирует/видоизменяет их (как менеджер и творец).

Микроэлектроника использует для себя технологии материаловедения, и, в свою очередь, так как формирует электронную компонентную базу, используется в технологии создания радиоэлектронной аппаратуры. Более подробные связи показаны на рис. 3 в виде дерева, в правой части которого указана целевая продукция, где будут использованы изделия микроэлектроники, а в левой – номенклатура классов изделий, при этом корневая часть дерева систематизирует факторы, без которых невозможно производство (в левой части сосредоточены в основном технологические знания, а в правой – вспомогательные ресурсы).

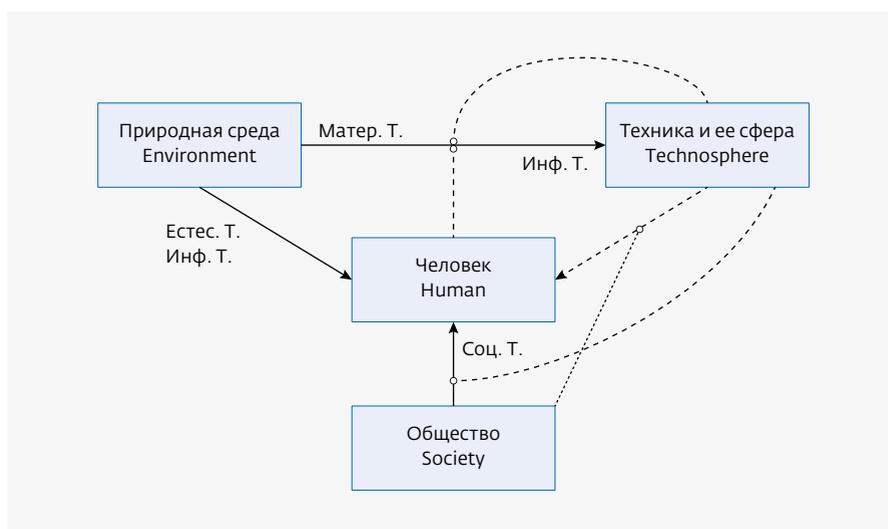
История отечественной, да и мировой микроэлектроники прошла непростой извилистый путь (см. поучительную статью А.А. Васенкова [64]). В качестве примера случайностей укажем на влияние непростых человеческих отношений лиц (или кланов с объективными интересами), принимающих решение, иногда судьбоносное для развития отрасли, когда сталкиваются два подхода: «копировать успешное импортное» и «развивать с нуля свое» [65].

Создание новой технологии и новых микросхем – это не только решение сложных технических задач. При этом необходимо решать взаимосвязанные технические, организационные и коммерческие проблемы. Необходимо правильно определить допустимую сложность поставленной задачи, находить нужную для ее решения методологию, учитывать все аспекты решения этой задачи и правильно выбирать оптимальный уровень сложности и обязательно учитывать проблему сокращения риска при создании новой технологии. Очевидно, что в этой ситуации в значительной мере возрастает стоимость принятия решения по созданию нового производства. Как правило, это стратегическое решение. Подготовка и его принятие – это процесс, требующий системного подхода, исходя

из анализа множества различных причинных факторов и необходимости управления ими для получения оптимального результата. Только в этом случае можно предусмотреть возникновение проблем и установить пути их решения. А для этого нужно было предварительно определить все необходимые исходные данные и информационное обеспечение. При моделировании этой системы недопустимо игнорирование отдельных ее частей, внешних параметров окружающей среды и даже мелких погрешностей. С целью исключения этого требуется системный подход, включающий этапы разбиения системы на отдельные элементы, их анализ, структурное, техническое и организационное проектирование, прогнозирование, диагностика и контроль с последующим синтезированием для оптимизации и приведения в соответствие всех составляющих системы и получения максимально эффективного результата.

\* \* \*

Этой публикацией мы открываем цикл статей, посвященных развертыванию авторского варианта общей теории технологий с привлечением фактического материала технологии микроэлектроники. В первой части были рассмотрены существующие подходы к понятию «технология» и предложена пятиуровневая иерархическая схема исследования технологии.



**Рис. 2.** Взаимодействие четырех типов технологий. Стрелками (сплошные линии) указаны причинно-следственные связи, задаваемые технологией. Пунктирными линиями с кружком – вторичные факторы (отвечают на вопрос: посредством чего?). Пунктирными стрелками показаны нетехнологические влияния

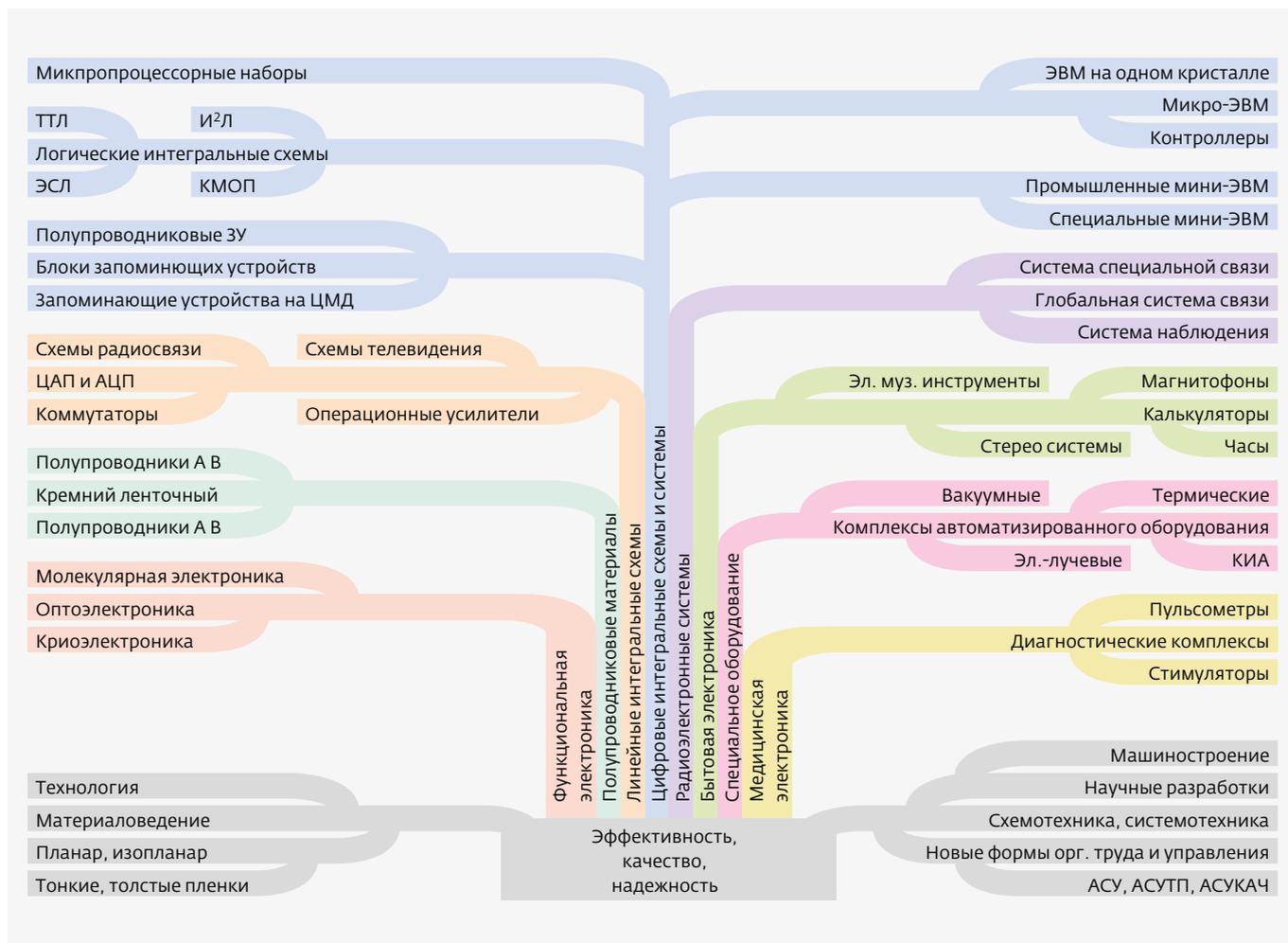


Рис. 3. Смежные с микроэлектроникой технологии и номенклатура ее изделий в 80-х годах XX века [64]. Сокращения: КИА – контрольно-измерительная аппаратура, АСУ (ТП/КАЧ) – автоматизированная система управления (технологическими процессами/качества), ЦМД – цилиндрические магнитные диски

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Матюшкин И.В.** Математическое моделирование технологических процессов на примере автоэпитаксии кремния // Дис. соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук по спец. 05.13. 18.- Долгопрудный, 2000. 107 С.
2. **Матюшкин И.В., Кузьмин С.Н.** Применение нормальных алгорифмов Маркова для описания технологических процессов микроэлектроники // Сб. научн. трудов «Моделирование процессов управления и обработки информации». - Долгопрудный: МФТИ, 1998. С. 90-94.
3. **Матюшкин И.В.** К вопросу формализации научно-технического прогресса // Электронный журнал «Исследовано в России». 2000. № 20. С. 282-291, <http://zhurnal.mipt.rssi.ru/articles/2000/020.pdf>.
4. **Матюшкин И.В.** Концептуализация понятия технологии // Электронный журнал «Исследовано в России». 2000. № 54. С. 786-797. <http://zhurnal.mipt.rssi.ru/articles/2000/054.pdf>.
5. **Горнев Е.С.** Промышленная субмикронная технология СБИС // Дис. на соиск. уч. ст. канд. тех. наук по спец. 05.27.01.- М., 1998. 81 С.
6. **Горнев Е.С.** Разработка и внедрение промышленной субмикронной технологии СБИС // Дис. на соиск. уч. ст. док. тех. наук по спец. 05.27.01.- М., 2000. 487 С.
7. **Куприенко С.В.** Инновационные подходы к развитию техники и технологий. В 2-х кн.: монография [авт.кол. Егоров Б.В., Косолапов А.А., Ткаченко и др.]. - Одесса, 2015.
8. **Иукурдзе Э.Ж., Егоров Б.В., Ткаченко О.Б.** Современные представления о раз-

- витии технологии вина как науки // Материалы конференции. <http://www.sworld.com.ua/simpoz5/74.pdf>.
9. **Лем С.** Сумма технологии // Собр. соч. Т. 13. – М.: Текст, 1996. 436 с.
  10. **Уголев А.М.** Естественные технологии биологических систем. – Л.: Наука, 1987. 317 с.
  11. **Романенко В.Н.** Принципы общей теории технологий. – СПб: Изд. СПбГАСУ, 1994. 52 с. <http://moikariver.ru/oglavlenie>.
  12. **Романенко В.Н., Никитина Г.В.** Общие технологии. – СПб: Изд. ИВЭСЭП, 2011. 277 с.
  13. **Крылов С.М.** Формально-технологические модели в общей теории систем // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2003. Т. 5. № 1. С. 83–90.
  14. **Krylov S.M.** Formal technology and cognitive processes // International Journal of General Systems. 1996. Т. 24. № 3. С. 233–243.
  15. **Крылов С.М.** Теория и методы разработки многофункциональных программируемых технологических систем на основе формально-технологического анализа // Дис. на соис. уч. ст. док. тех. наук по спец. 05.13.01. – Самара, 2005. 451 с.
  16. **Андреев Д.А.** Способы формализованного описания технологий: попытка обзора // Труды ППИ. Сер., Машиностроение. Электротехника. 2011. №15.3. С. 291–297.
  17. **Андреев Д.А.** Моделирование темпоральных отношений в онтологиях технологических действий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 3 (299). С. 40–49.
  18. **Андреев Д.А.** Модели, алгоритмы и показатели качества формализованного описания и анализа технологий производства продукции // Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. тех. наук по спец. 05.13.01. – Псков, 2016. 20 с.
  19. **Булатов Г.Я.** Введение в общую теорию технологий (на примере строительства): уч. пос. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. 174 с.
  20. **Чистяков Ю.Д., Райнов Ю.П.** Физико-химические основы технологии микроэлектроники. – М.: Металлургия, 1979. 408 с.
  21. **Трипольский Р.И.** Прологомены к общей теории университета // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. №4. С. 790–796.
  22. Современные образовательные технологии: уч. пос. / Авт.-сост. М.Ю. Олешков. – Нижний Тагил: НТГСПА, 2011. 144 с.
  23. **Кутепов А.М., Бондарева Т.И., Беренгартен М.Г.** Общая химическая технология. – М.: Высшая школа, 1990. 520 с.
  24. **Глазов Г.А.** Разработка технологических процессов: учеб. пос. – Л.: ЛИТМО, 1985. 84 с.
  25. **Соболев С.Ф.** Электронный учебник по дисциплине: «Технология приборостроения». [http://de.ifmo.ru/bk\\_netra/select.php](http://de.ifmo.ru/bk_netra/select.php).
  26. Основы общей теории технологий: конспект лекций. – Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. [edu.vgasu.vrn.ru](http://edu.vgasu.vrn.ru).
  27. Экономические основы технологического развития / Сост. Е.П. Никифорова. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005. <http://www.studfiles.ru/preview/1971379>.
  28. **Холоша В.И.** Теория технических систем: конспект лекций. – Днепрпетровск: Национальный горный университет Украины, 2014. 104 с.
  29. Теория технических систем: конспект лекций / Сост.: В.В. Дубинский, А.С. Игнатъев. – Сумы: Сумский государственный университет, 2015. 48 с.
  30. **Хубка В.** Теория технических систем. – М.: Мир, 1987. 208 с.
  31. **Кириллов Н.П.** Концептуальные модели технических систем с управляемыми состояниями: обзор и анализ // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 4. С. 81–91.
  32. **Мамфорд Л.** Миф машины: техника и развитие человечества / Пер. с англ. Азаркович Т., Скура-тов Б. (1 глава). – М.: Логос, 2004. 284 с.
  33. **Карр Н.** Великий переход: что готовит революция облачных технологий. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013. 272 с.
  34. **Сахал Д.** Технический прогресс: концепции, модели, оценки. – М.: Финансы и статистика, 1985. 184 с.
  35. **Шумпетер Й.** Теория экономического развития. Капитализм, социализм и демократия. – М.: Эксмо, 2007. 864 с.
  36. **Глазьев С.Ю., Львов Д.С., Фетисов Г.Г.** Эволюция технико-экономических систем: возможности и границы централизованного регулирования. – М.: Наука, 1992. 207 с.
  37. **Brown M.** On the Theory and Measurement of Technological Change, Cambridge University Press, London, 1966. 214 с.
  38. **Murray B., de Cani J.S.** A Measure of Technological Employment // The Review of Economics and Statistics. 1963. Vol. 45. No. 4. С. 386–394.
  39. **Solow R.M.** We'd better watch out // The New York Times, Section: Book Review. 12 July 1987. С. 36.
  40. **Arya I.C.** On measuring technological change in cement industry in India // Artha Vijnana 1981. Vol. 43(2). С. 167–175.

41. **Meijer H.** On the diffusion of technologies in a vintage framework // Unpublished Ph. D. dissertation, University of Maastricht. 1994. 335 с.
42. **van Dijk M.F.** Technological change and the dynamics of industries: Theoretical issues and empirical evidence from Dutch manufacturing, Ph. D. dissertation, Maastricht university, 2000. 207 p.
43. **Normaler Z.O.** Technological Change, International Trade, and Growth: an evolutionary Multi-agents-based modeling Approach, Ph. D. dissertation, Universiteit Maastricht, 2006. 351 p.
44. **Jantsch E.** Technological forecasting in perspective: A framework for technological forecasting, its technique and organization: a description of activities and an annotated bibliography. – Organisation for Economic Co-operation and Development, 1967. 399 p.
45. **Benoit G.** Technological Change: What do Technology and Change stand for? // Project on the Intellectual History of Innovation Working Paper. 2015. No. 24. С. 53.
46. **Wilson Ch., Grubler A.** Lessons from the history of technology and global change for the emerging clean technology cluster // Background Paper, World Economic and Social Survey. 2011. С. 43.
47. **Leibbrandt J.G.** Payment Systems and Network Effects: Adoption, Harmonization and Succession of Network Technologies in a Multi-country World, Ph. D, Universiteit Maastricht, 2004. 252 p.
48. **Bresnahan T.F., Trajtenberg M.** General purpose technologies ‘Engines of growth’? // Journal of Econometrics. 1995. № 65. С. 83-108.
49. **Jovanovic B., Rousseau P.L.** General Purpose Technologies // Handbook of Economic Growth, Volume 1B., 2005. С. 1182-1224.
50. **Markus M.L., Robey D.** Information technology and organizational change: causal structure in theory and research // Management science. 1988. Vol. 34. № 5. С. 583-598.
51. **Бовин А.А., Чередникова Л.Е., Якимович В.А.** Управление инновациями в организации: уч. пос. / 3-е изд., стер. – М.: Омега-Л, 2009. 415 с.
52. **Кричевский С.В.** Эволюция технологий, «Зеленое» развитие и основания общей теории технологий // Философия и космология. 2015. Т. 14. № 1. С. 120-139.
53. **Ulhøi J.P., Gattiker U.E.** The Nature of Technological Paradigms: A Conceptual Framework, in The Technology Management Handbook, CRC Press // IEEE Press, New York, 1999. С. 7-87-7-93.
54. **Dosi G., Nelson R.R.** The Evolution Of Technologies: An Assessment Of The State-Of-The-Art // Eurasian Business Review. 2013. № 1. С. 3-46.
55. **Peine A.** Technological Paradigms Revisited – How They Contribute to the Understanding of Open Systems of Technology, 2006. С. 1-27.
56. **Mandel G.N.** History Lessons for a General Theory of Law and Technology // Minn. J. of Law, Sci. & Tech. – 2007. С. 551.
57. **Feenberg A.** Transforming technology: A critical theory revisited. – Oxford University Press, 2002. 217 с.
58. **Olsen J.K. B., Pedersen S.A., Hendricks V.F.** A Companion to the Philosophy of Technology. – John Wiley & Sons, 2012. 65 p.
59. **Francis R.D.** The Technological Imperative in Canada: An Intellectual History. – Toronto: UBC Press, 2009. 357 p.
60. **Ozbekhan H.** The Triumph of Technology: «can implies ought». – System Development Corporation, 1967. P. 83-93.
61. **Vernor V.** The Coming Technological Singularity // VISION-21 Symposium, March 30-31, 1993. <http://old.computerra.ru/think/205650>.
62. Сингулярность. Образы «постчеловечества» / Под ред. К. Фрумкина. – М.: ТД Алгоритм, 2016. 320 с.
63. **Митрофанов С.П.** Групповая технология машиностроительного производства: в 2-х т. – Л.: Машиностроение, 1985. Т. 1. 405 с.
64. Некоторые события из истории микроэлектроники // Александр Анатольевич Васенков / Под ред. Б.М. Малашевича, серия «Созидатели отечественной электроники». – М.: «ТЕХНОС-ФЕРА», 2010, [http://www.computer-museum.ru/books/vasenkov/vasenkov\\_3-1.htm](http://www.computer-museum.ru/books/vasenkov/vasenkov_3-1.htm).
65. **Любимов Б.** Отставание и зависимость России в компьютерной элементной базе // портал информационного агентства «Красная весна» / газета «Суть времени». № 195. <http://rossaprimavera.ru/issue/195>.

# ОСОБЕННОСТИ ПОНЯТИЯ "КРАТНОСТЬ ВОЗДУХООБМЕНА" ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЧИСТЫМ ПОМЕЩЕНИЯМ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

► А.В. Маркин  
АО "НИИМЭ"

Настоящая работа посвящена оценке одной из основных характеристик чистых помещений, предназначенных для производства ИМС, так называемой кратности воздухообмена в помещении. Рассмотрены факторы, существенно влияющие на величину этой характеристики. Показано, что она все же является вторичной по отношению к более важной характеристике – объему воздуха, подаваемого в единицу времени на единичную площадь рабочей зоны чистого помещения. Затронутые в статье вопросы нуждаются в более детальном освещении, что планируется сделать в последующих публикациях.

## THE FEATURES OF THE CONCEPT "VENTILATION RATE", IN RELATION TO CLEAN ROOMS FOR PRODUCTION PURPOSES

A.V. Markin

MERI SC

The article is dedicated to one of the main characteristics of the clean rooms that intended for the production of IMS – the so-called ventilation rate in the room. This paper examines factors significantly affecting the value of this characteristic. It is shown that however it is secondary to the more important characteristic that is the volume of air supplied in unit time on unit area of the working area of a clean room. Issues raised in the article need in more detailed coverage of that is planned to do in subsequent publications.

**П**роцесс изготовления современных интегральных микросхем включает выполнение нескольких сотен технологических операций производимых на комплексе сложнейшего автоматизированного оборудования, находящегося в чистых помещениях [1, 2].

В зависимости от класса помещений для обеспечения заданного класса чистоты в чистых помещениях промышленного назначения [3] рекомендуется:

- для помещений класса БИСО (тип потока воздуха – однонаправленный) и выше поддерживать определенную среднюю скорость потока воздуха;

- для помещений класса БИСО и ниже (тип потока воздуха – не однонаправленный или смешанный) обеспечивать подачу воздуха на единицу площади чистого помещения ( $1 \text{ м}^2$ ) в определенном объеме ( $\text{м}^3$ ) за единицу времени (1 ч).

*Примечание 1. Учитывая направленность данной работы, встречающиеся в тексте термины "помещение", "чистое помещение" и аббревиатура "ЧП" однозначны и равноценны. В отдельных случаях для выделения зоны, где происходит обработка продукции будет применяться термин "чистое производственное помещение" или "ЧПП".*

В случае организации вентиляции чистого помещения по типу потока воздуха не однонаправлен-

ный или смешанный (зачастую и для помещений с однонаправленным потоком воздуха, особенно в отечественной практике), вводится характеристика, называемая "кратность воздухообмена", которая для большинства специалистов, занимающихся проектированием чистых помещений, является основным опорным параметром для дальнейших расчетов. И это действительно так, поскольку при создании чистых помещений основная часть капитальных затрат (до 60%) [4], [5] связана с организацией системы воздухообмена, а при эксплуатации ЧП и того больше – до 70% затрат на содержание чистого помещения уходит на поддержание работы систем, обеспечивающих параметры микроклимата. В многочисленных определениях понятия "кратность воздухообмена" приводимых в отечественной нормативно-технической документации и технической литературе, с той или иной степенью определенности звучит: "Кратность воздухообмена – это величина, которая показывает, сколько раз за определенный промежуток времени (как правило, 1 ч) **весь** воздух в помещении был полностью заменен (**новым** воздухом). Математически это выражается как отношение объема воздуха подаваемого в помещение (или удаляемого из него) в течение 1 ч к внутреннему объему помещения:

$$N = L/V, \tag{1}$$

где  $N$  – кратность воздухообмена,  $ч^{-1}$ ,  $L$  – объем поданного/удаленного воздуха в помещении,  $м^3/ч$ ,  $V$  – внутренний объем помещения,  $м^3$ .

*Примечание 2. Поскольку полный объем приточного в помещении воздуха (от внешних вентиляционных систем и других устройств и из-за инфильтрации) в устоявшемся режиме воздухообмена равен полному объему воздуха, удаляемого из помещения (вытяжные системы, выполнение логистических операций, утечки через ограждающие конструкции и др.), то в дальнейшем по тексту будем использовать только термин "приточный воздух". Безусловно, это равновесие носит динамический характер\*, но в рамках рассматриваемой темы возникающие вследствие этого поправки не носят принципиального характера.*

В процессе обмена правильнее говорить замены (см. пояснение на рис. 1.) воздуха в чистом помещении можно выделить две составляющие, протекающие одновременно.

\* Динамическое равновесие поддерживается автоматически, по поддержанию заданного избыточного давления воздуха в чистом помещении относительно окружающей среды.

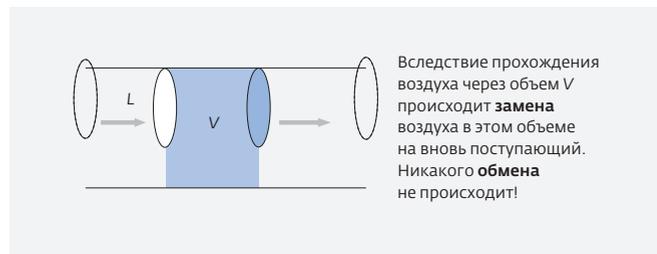


Рис. 1. Прохождение воздуха через замкнутый объем

Это, во-первых, процесс удаления воздуха из ЧП, и, во-вторых, процесс наполнения чистого помещения новым воздухом. Таким образом, выражение (1) для расчета кратности воздухообмена можно применять только в случае, если воздух из помещения удаляется полностью, то есть нигде в помещении нет отдельных объемов, из которых воздух не удаляется. Аналогично в помещении не должно быть никаких отдельных объемов, куда новый воздух не поступает.

Сформулируем **первое граничное условие** применения понятия "кратность воздухообмена": замена воздуха в помещении, то есть удаление воздуха из помещения и заполнение помещения новым, должна быть безоговорочно полной во всем объеме помещения.

"Новый воздух" может быть двух типов, как показано на рис. 2.

- "Новый" (или другими словами "приточный"\*\*) воздух целиком весь новый (назовем такой воздух "наружный"), как показано на рис. 2а). Эффектами, связанными с неоднородностью воздуха (слои воздуха с разными характеристиками), можно пренебречь.
- "Новый" воздух частично новый и частично старый, то есть который уже побывал в помещении, был удален из него и направлен в помещение вновь (назовем такой воздух рециркуляционным), как показано на рис. 2б). В этой схеме также возможны два основных варианта:

Вариант 1. Старый (рециркуляционный) воздух без переработки смешивается с новым и после совместной фильтрации подается в ЧП, как показано на рис. 7а). Средняя скорость потоков воздуха в воздуховодах при такой схеме достигает нескольких метров в секунду (типовое значение 3 м/с). Тогда

\*\* Термины, обозначающие тип воздуха, по ГОСТ Р ЕН 13779-2007 "Вентиляция в нежилых зданиях. Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования".

число Рейнольдса  $Re = \frac{\rho \theta l}{\mu}$  (где  $\rho$  –

плотность воздуха,  $1,205 \text{ кг/м}^3$ ,  $\theta$  – скорость воздуха,  $3,0 \text{ м/с}$ ,  $l$  – характерный размер воздуховода,  $1,0 \text{ м}$ ,  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха,  $18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Пахсек}$ )\* для этого случая достаточно большое,  $Re \approx 2 \cdot 10^5$ , и потоки будут турбулентными. Перемешивание потоков воздуха произойдет в воздуховодах и устройствах подачи воздуха в чистое помещение. Следовательно, и в этом случае можно считать, что в ЧП подается воздух, однородный по физическим параметрам и плотности распределения в нем частиц.

Вариант 2. Старый воздух подвергается дополнительной индивидуальной переработке (как правило, охлаждению, изменению влагосодержания, очистке), смешивается с новым и после совместной фильтрации подается в ЧП, как показано на рис. 7б и в. Для этой схемы степень перемешивания подаваемого и рециркуляционного (другими словами однородность) воздуха существенно зависит от конструкции всего тракта вентиляции и воздухообмена. Это обязательно необходимо учитывать при проектировании. Некоторые конструкторы чистых помещений, специально организуют подачу приточного воздуха непосредственно в рециркуляционную шахту для лучшего перемешивания. При этом, зачастую возникает эффект обратной рециркуляции и эффективный объем подаваемого в ЧП воздуха сокращается.

Рассмотрим в выражении (1) обе составляющие, определяющие величину кратности воздухообмена.

## ПОДАВАЕМЫЙ ВОЗДУХ

Очевидно, что для заданного помещения, с внутренним объемом  $V$ , кратность воздухообмена зависит именно от объема приточного (подаваемого) воздуха  $L$ , который выбирают как максимальное из значений, полученных из следующих соображений (I–V):

I. количество воздуха, которое необходимо подавать в чистое помещение, зависит от класса чистого помещения (счетной концентрации частиц в воздухе ЧП), интенсивности образования в ЧП загрязнений (внутренняя генерация и/или из внешних

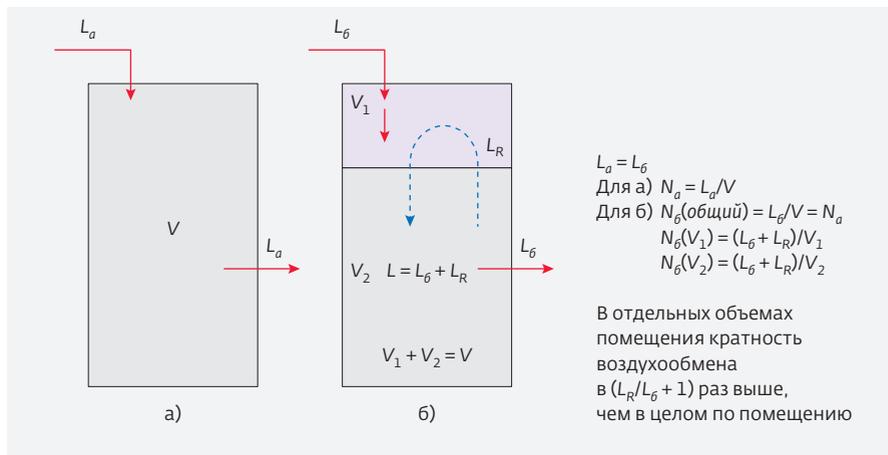


Рис. 2. Два принципиальных подхода к организации вентиляции помещений: а – рециркуляции воздуха нет; б – рециркуляция воздуха организована

источников) и требуемой скорости восстановления заданного класса чистоты.

Для составления уравнения баланса поступления частиц в чистое помещение и их удаления из него введем следующие понятия и ограничения.

- Исходная концентрация частиц в воздухе чистого помещения  $C_{CR}(t=0) = C_{CR}(0)$ , а  $C_{CR}(t)$  – концентрация частиц в воздухе чистого помещения в момент времени  $t$ . Уравнение баланса составим только применительно к определенному критическому размеру частиц ( $R, R + dR$ )\*\* , поскольку характеристики системы очистки воздуха в чистых помещениях (эффективность фильтрации HEPA и ULPA фильтрами тонкой очистки воздуха, эффективность вентиляции) существенно зависят от размера частиц\*\*\*.
- Все потоки воздуха перемешиваются мгновенно. Все вносимые загрязнения распространяются по всему объему чистого помещения и трактам воздухообмена мгновенно\*\*\*\*. Попадание частиц

\*\* В данном случае за размер частиц будем принимать диаметр сферических частиц с эквивалентными аэродинамическими характеристиками.

\*\*\* Для помещений класса БИСО и выше расчет надо вести по размеру частиц соответствующих *mpps* (*most penetration particle size*) для установленных фильтров, а для помещений класса 7ИСО и ниже – по размеру частиц  $0,5 \text{ мкм}$ .

\*\*\*\* На самом деле, как показано выше, это не так. Значения концентраций частиц в отдельных местах чистого помещения может существенно различаться. Поэтому в приведенных уравнениях речь идет только об усред-

\* Значения параметров взяты при нормальных условиях.

в чистое помещение происходит за счет внешнего загрязненного воздуха и за счет внутренних генераций.

4. Причины загрязнения воздуха чистого помещения частицами от внутренних генераций не являются темой настоящей работы. Отметим лишь их общие свойства, важные для рассмотрения здесь: при загрязнении такого рода не происходит какого-либо значимого изменения в воздухообмене чистого помещения, и мощность источника такого загрязнения носит усредненно линейный характер (иными словами количество частиц, введенных в воздух чистого помещения таким источником в среднем пропорционально времени его действия). Если  $g_p(t)$  – мощность такого источника, шт./с, то за время  $t$  он введет в воздух чистого помещения

$$P_p = \int_0^t g_p(t) dt = \bar{g}_p t, \quad (2)$$

где  $\bar{g}_p$  усредненное значение мощности генерации загрязнения.

5. Частицы попадают в чистое помещение извне тремя основными путями.
  1. Вследствие организации выполнения логистических функций через воздушные шлюзы. Как правило, в этих шлюзах организован каскад перепадов давлений воздуха от более чистого помещения к менее чистому по убыванию, то есть воздух выдувается из чистого помещения и количество частиц попадающих в чистое помещение невелико (в основном за счет носителя – человека или материалов). Кроме этого, вброс частиц носит периодический характер и учитывается при расчете мощности системы воздухообмена чистого помещения по времени восстановления. Как сказано выше, объем этого выбрасываемого воздуха учтен в общем балансе воздухообмена путем установления динамического равновесия\*.
  2. Вследствие притока воздуха через негерметичные элементы ограждающих конструкций (инфильтрация). Казалось бы, что вследствие, как правило, более высокого давления воздуха

ненной по всему помещению концентрации частиц определенного размера. На практике, путем моделирования, определяют места наивысшей концентрации частиц в воздухе чистого помещения и возможный максимальный уровень концентрации частиц, и уже относительно него проводят соответственные расчеты.

\* См. Примечание 2.

внутри чистого помещения, воздух будет выдуться из чистого помещения наружу, а не наоборот, но это не всегда так. Например, вследствие необходимости защиты персонала и продукции от вредных факторов, сопутствующих проводимых в чистом помещении технологических процессов, давление воздуха внутри чистого помещения может быть установлено ниже, чем в окружающей среде. Также вследствие такого явления как инжекция, может происходить неконтролируемое всасывание наружного воздуха. Конечно, объем такого воздуха, относительно объема воздуха, подаваемого через приточные системы, незначителен, но концентрация частиц в таком воздухе (особенно, если он проникает через ограждающие конструкции, отделяющие чистое помещение от внешней среды, где не контролируется счетная концентрация частиц) может быть велика, и в чистое помещение с таким воздухом будет проникать весьма значительное количество частиц. Оценим относительный объем инфильтрованного загрязненного воздуха, который окажет значимое влияние на общую концентрацию частиц в чистом помещении. Пусть в чистое помещение из пленума через ФВМ подается за время  $t$  воздух объемом  $L$  с исходной концентрацией частиц  $C_0$ , где  $R$  – размер частиц. Воздух перед подачей в чистое помещение проходит очистку путем фильтрации с эффективностью  $\varphi$ . Тогда в чистое помещение с этим "штатным" воздухом попадет за время  $t P = C_0 L (1 - \varphi) t^{**}$  частиц. Если из пленума же в чистое помещение будет попадать воздух, минуя фильтры, то можно определить количество неотфильтрованного воздуха  $q$ , которое привнесет в ЧП такое же количество частиц –  $P = C_0 q t$ . Учитывая, что современные системы фильтрации воздуха имеют эффективность фильтрации  $\varphi = 0,99995$  и лучше, то  $q/L \leq 5 \cdot 10^{-5}$ , то есть в реальном чистом помещении класса БИСО, где на  $1 \text{ м}^2$  в час подает порядка  $100 \text{ м}^3$  очищенного воздуха, достаточно утечки  $q$  мощностью примерно  $5 \text{ л}$  воздуха на  $1 \text{ м}^2$  помещения в час, чтобы вызвать несоответствие установленным требованиям по классу чистоты. В общем виде  $P_q = C_q q t = g_q t$ .

*Примечание 3. Можно рассчитать площадь отверстий в ограждающих конструкциях, которые могут при-*

\*\* Здесь  $C_0$  – усредненная концентрация частиц в пленуме,  $L$  – расход приточного воздуха.

вести к вышеуказанному воздействию. Очевидно, что  $S = q / \vartheta t$ , где  $S$  – общая площадь нештатных отверстий (мест инфильтрации) в ограждающих ЧП конструкциях,  $m^2$ ,  $\vartheta$  – скорость движения воздуха через отверстия,  $m/s$ . Воспользуемся уравнением Бернулли для определения скорости потока воздуха, перетекающего через отверстие вследствие перепада давлений

$$\vartheta = \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_1}{\rho} \left( 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right)}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – адиабатная постоянная,  $P_1 - P_2 = \Delta P$  – образовавшийся перепад давлений, Па,  $P_1$  – нормальное атмосферное давление, Па,  $\rho$  – плотность воздуха,  $kg/m^3$ . Результаты расчетов показаны на рис. 3. Даже при  $\Delta P = 5$  Па скорость потока воздуха составит  $\vartheta \approx 2,88$  м/с. При такой скорости потока воздуха, площадь отверстий в потолке ЧП составит примерно  $S \approx 4,82 \cdot 10^{-7} m^2$ . Очевидно, что необходимо обеспечивать максимальную герметичность ограждающих конструкций чистого помещения, прежде всего в местах возможной инфильтрации. В частности, в рассмотренном примере о потолке чистого помещения, критичными будут места примыкания фильтров к корпусам ФВМ, так как в случае наличия отверстий, возможно прямое попадание через них под воздействием вентилятора ФВМ неочищенного воздуха в ЧП.

3. Вследствие работы системы подачи воздуха в чистое помещение – в приточном воздухе концентрация частиц не равна нулю. За время  $t$  в чистое производственное помещение поступит частиц с учетом вышесказанного:

$$L(1 - \varphi)t = (1 - \varphi) \left( C_n L_n t + \varepsilon L_R \int_0^t C_{CR}(t) dt \right) \quad (4)$$

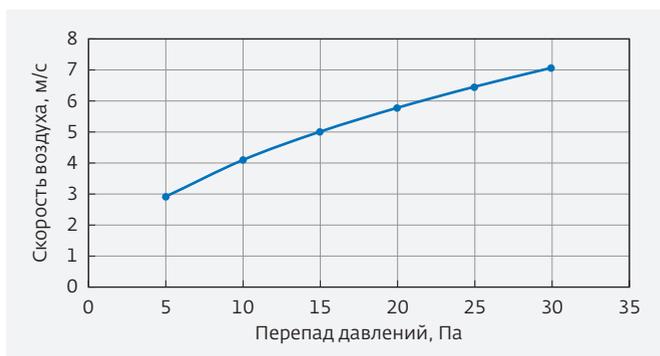


Рис. 3. Влияние перепада давления между двумя разделенными объемами воздуха на скорость перетекания воздуха через отверстие в перегородке

где  $L_n$  – расход наружного воздуха,  $m^3/s$ ,  $C_n$  – концентрация частиц в наружном воздухе,  $L_R$  – расход рециркуляционного воздуха, при  $(1 - \varphi) C_n L_n t = g_s t$  – количество частиц, поступившее в чистое помещение от наружного воздуха, где  $\varepsilon$  коэффициент, характеризующий эффективность работы системы вентиляции  $\varepsilon = \frac{C_{ex} - C_s}{C_{CR} - C_s}$ , где  $C_{ex}$  – концен-

трация частиц в удаляемом из чистого помещения воздухе,  $C_s$  – концентрация частиц

в приточном воздухе,  $C_s = \frac{P}{Lt}$ .

Общее для всех механизмов поступления частиц в чистое помещение количество поступивших частиц, как и в случае внутренней генерации, в среднем линейно пропорционально времени поступления.

5. Удаляются частицы из чистого помещения двумя основными путями:
  - С воздухом, вытягиваемым принудительно (вытяжные системы) и выбрасываемым вследствие работы логистической системы, а также через незагерметизированные отверстия в ограждающих конструкциях (экспульсия). Аналогия с механизмами поступления частиц практически полная, за исключением того, что концентрация частиц в удаляемом воздухе, для всех этих случаев, практически одинаковая и равна средней концентрации частиц в воздухе чистого помещения. Также еще раз обратим внимание на то, что общий объем удаляемого из чистого помещения воздуха при установившемся динамическом равновесии, практически равен объему наружного воздуха, подаваемого в систему воздухообмена чистого помещения. Тогда за время  $t$  будет удалено из чистого помещения

Тогда за время  $t$  будет удалено из чистого помещения

$$P_{ex} = \varepsilon L_n \int_0^t C_{CR}(t) dt. \quad (5)$$

- Частицы удаляются из воздуха чистого помещения вследствие удержания их фильтрами и другими элементами системы воздухообмена

\* В этом виде коэффициент эффективности вентиляции  $\varepsilon = \varepsilon(t)$ , т.к. зависит от  $C_{CR}(t)$ . Для упрощения анализа зафиксируем его, как величину постоянную, характеризующую только эффективность работы системы вентиляции.

с эффективностью  $\varphi^*$ . Количество частиц, удаляемых за счет фильтрации учтено в (4).

С учетом вышесказанного можно составить уравнение баланса поступления и удаления частиц из чистого помещения.

$$P_{CR}(t) = P_{CR}(0) + g_p t + C_q q t + (1 - \varphi) \left( C_n L_n t + \varepsilon L_r \int_0^t C_{CR}(t) dt \right) - L_n \cdot \int_0^t C_{CR}(t) dt. \quad (6)$$

С учетом того, что  $C_{CR}(t) = P_{CR}(t) / V$ , где  $V$  – объем чистого помещения,  $m^3$ , напишем решение такого уравнения в виде\*\*

$$C_{CR}(t) = \left( C_{CR}(0) - \frac{g}{\varepsilon L} \right) e^{-\frac{\varepsilon g t}{V}} + \frac{G}{\varepsilon L} = C_{CR}(0) e^{-\frac{\varepsilon g t}{V}} + \frac{g}{\varepsilon L} \left( 1 - e^{-\frac{\varepsilon g t}{V}} \right), \quad (7)$$

где  $g = g_p + g_q + g_s$ .

Из уравнения (7) по заданному целевому значению  $C_{CR}(t)$  и установленным средним значениям  $g_p, g_q, g_s$  легко рассчитать значение  $L$ , а также время восстановления чистоты в ЧП при их пиковых изменениях.

При граничных значениях: при  $t = 0, C_{CR}(t) = C_{CR}(0)$ , при  $t \rightarrow \infty, C_{CR} \rightarrow \frac{g}{\varepsilon L}$ .

Приведенное решение хорошо коррелирует с представленным в ГОСТ Р 56190-2014 [6] аналогичным уравнением\*\*\*

$$C_{CR}(t) = \left( C_{CR}(0) - \frac{g_p}{k_1} - \frac{k_2}{k_1} \right) e^{-\frac{k_1 t}{V}} + \frac{g_p}{k_1} + \frac{k_2}{k_1}, \quad (8)$$

$$k_1 = \varepsilon_0 L \left[ 1 + \frac{q}{L} - x(1 - \varphi) \right], \quad (9)$$

$$k_2 = (1 - x)(1 - \varphi) L C_n + q C_q. \quad (10)$$

\* Эффективность фильтрации соответствует эффективности фильтров тонкой очистки воздуха для выбранного размера частиц. Скорость движения воздуха через фильтр выберем типовую, порядка 0,03...0,045 м/с (для фильтровального блока толщиной 50 мм). Безусловно, механизм осаждения частиц на конструктивных элементах чистого помещения, особенно в системе рециркуляции воздуха, увеличивает эффективность фильтрации, но оценить этот вклад достаточно сложно.

\*\* Метод решения и принятые допущения в рамках данной работы не приводятся.

\*\*\* В ГОСТ Р ИСО 14644-4-2002 приводится еще один вариант этого решения:  $C_{CR}(t) - C_n = C_{CR}(t=0) + g/L(1 - e^{-Lt/V})$ , которое просто получается из (7) путем введения некоторых упрощений.

где  $x$  – доля рециркуляционного воздуха  $L_R = xL$ . Тогда доля наружного воздуха в приточном  $L_n = (1 - x)L$  и естественно  $L = L_n + L_R = xL + (1 - x)L$ .

- II. воздуха надо подавать в помещение столько, чтобы обеспечить выполнение требований к основным параметрам микроклимата в помещении: температуры и влажности воздуха.
- III. воздуха надо подавать в помещение в количестве достаточном, чтобы купировать воздействие негативных факторов:

$$L = \frac{G_{вал}}{g_{ном} - g_{пр.в}}, \text{ м} - \text{допустимое/заданное значение}$$

фактора,  $f/m^3, g_{пр.в}$  – концентрация фактора в приточном воздухе,  $f/m^3$ .

- IV. воздуха надо подавать в помещение в объеме, достаточном для компенсации воздуха, удаляемого системой вытяжной вентиляции, и создания избыточного давления в помещении.
- V. воздуха надо подавать в помещение столько, чтобы были соблюдены нормативные требования к объему подаваемого в чистое помещение наружного воздуха для обеспечения безопасности труда и здоровья персонала, работающего в этом помещении.

Основной принцип работы чистого помещения в том, чтобы за счет подачи чистого воздуха внутрь помещения "разбавить" вносимые загрязнения и удалить их. Чем выше требования к чистоте воздуха помещения и чем интенсивней вносятся загрязнения, тем больше надо подавать чистого воздуха. С другой стороны, чем выше эффективность работы системы вентиляции и системы фильтрации воздуха, тем меньше воздуха надо подавать в чистое помещение для достижения заданного эффекта. Приведенные выше рассуждения показывают, что при расчетах объемов приточного (подаваемого) воздуха, необходимо, прежде всего, исходить из этих соображений.

## ВНУТРЕННИЙ ОБЪЕМ ПОМЕЩЕНИЯ

Кратность воздухообмена также далеко не однозначная как характеристика чистого помещения, при рассмотрении аспектов, связанных со второй составляющей ее определения – "объем чистого помещения". Чистое помещение состоит не только из непосредственно чистого производственного помещения – ЧПП (еще его называют "белая зона"), но и вспомогательной сервисной зоны (т.н. "серой зоны") и объемов тракта воздухообмена (плenums, пространства под фальшполом, рециркуляционных шахт). Таким образом, рассчитывая кратность воздухообмена в чистом помещении, необходимо четко определять о каких

объемах этого помещения идет речь. Выделим, по крайней мере, пять аспектов, связанных с понятием "объем чистого помещения":

- геометрическое соотношение площади и высоты ЧП;
- геометрия ЧП в плане;
- конфигурация ЧП и всех объемов, входящих в тракт воздухообмена;
- изменение объема ЧПП при его оснащении и эксплуатации;
- нелинейная зависимость изменения объема подаваемого в ЧП воздуха с целью сохранения заданной кратности воздухообмена при изменении объема ЧП.

Рассмотрим более подробно влияние выделенных аспектов на понимание применения параметра "кратность воздухообмена". Для ясности понимания примем, что вклад потоков воздуха, непредусмотренных основной схемой вентиляции (инфильтрация, эксфильтрация, логистика), в получаемые результаты несущественен, и им можно пренебречь.

- 1. Геометрическое соотношение площади и высоты ЧП.** На рис. 5. показаны два одинаковых по объему  $V$  помещения, но сильно отличающихся по соотношению площади пола и высоты.
- Формально  $N_1=N_2$ , но все остальные параметры, важные для организации работы чистого помещения, разительно отличаются. В случае (рис. 5б) ( $S_2 \approx S_0$ ), в ЧП организован поток воздуха, близкий к однонаправленному, в случае а) ( $S_1 \gg S_0$ ) наоборот требуется организация неоднаправленного потока воздуха (если можно так выразиться – "сильно турбулентного") для исключения образования неветилируемых зон. Здесь уместно напомнить, что в ГОСТ Р ИСО 14644-4-2002 рекомендуется контролировать расход воздуха на единицу площади чистого помещения (с неоднаправленным и смешанным потоком воздуха), при этом высота помещения должна быть ограничена.
- 3. Геометрия ЧП в плане** вследствие своего разнообразия также вызывает неоднозначность понимания применимости термина "кратность воздухообмена". Рассмотрим на примере характерных планов чистых помещений, приведенных на рис. 6., связанные с планировкой чистых помещений особенности воздухообмена.

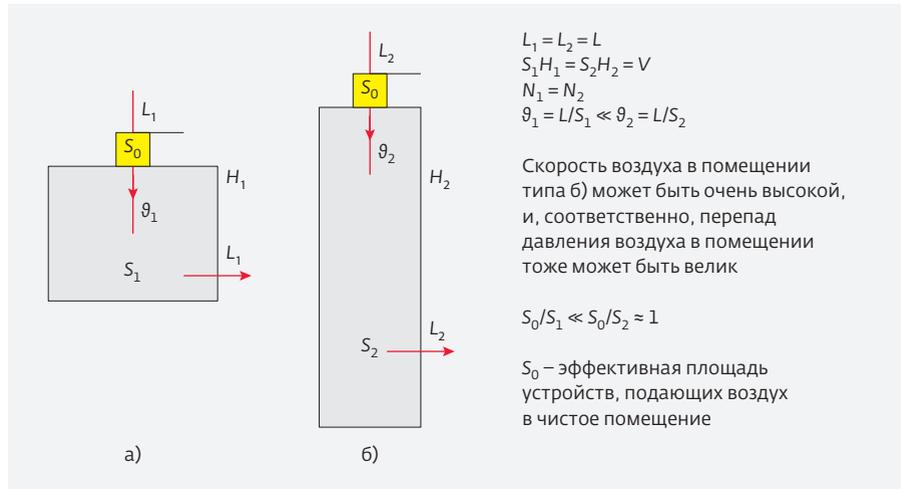


Рис.4. Помещения одинакового объема с различными соотношениями площади и высоты

РВ в этих помещениях с одинаковой высотой потолков  $h$ ,  $S_1=S_2$ , скорость  $\vartheta$  движения воздуха, подаваемого в чистые помещения через устройства  $S_0$ , везде одинаковая. Тогда  $N_1=5S_0t/(S_1h)=5S_0t/(S_2h)=N_2$ , то есть средняя кратность воздухообмена в этих помещениях одинаковая. Но, учитывая конфигурацию помещения (рис. 5б) можно утверждать, что кратность воздухообмена в зонах, выделенных затемнением серого цвета, составит не менее  $N_1=S_0t/(\frac{1}{8}S_2h)=8S_0t/(S_2h)$ , что существенно выше, чем средняя по помещению. Приведенный пример иллюстрирует, что понятие кратность воздухообмена в общем виде, без конкретной привязки к отдельным элементам чистого помещения, является неким усредненным параметром, не вполне однозначно характеризующим интенсивность воздухообмена. Вопрос "должно ли установленное зна-

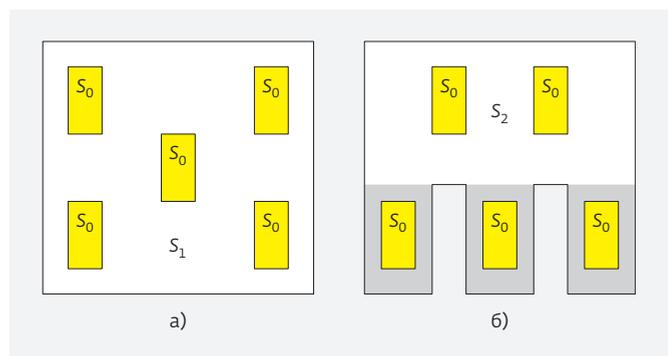
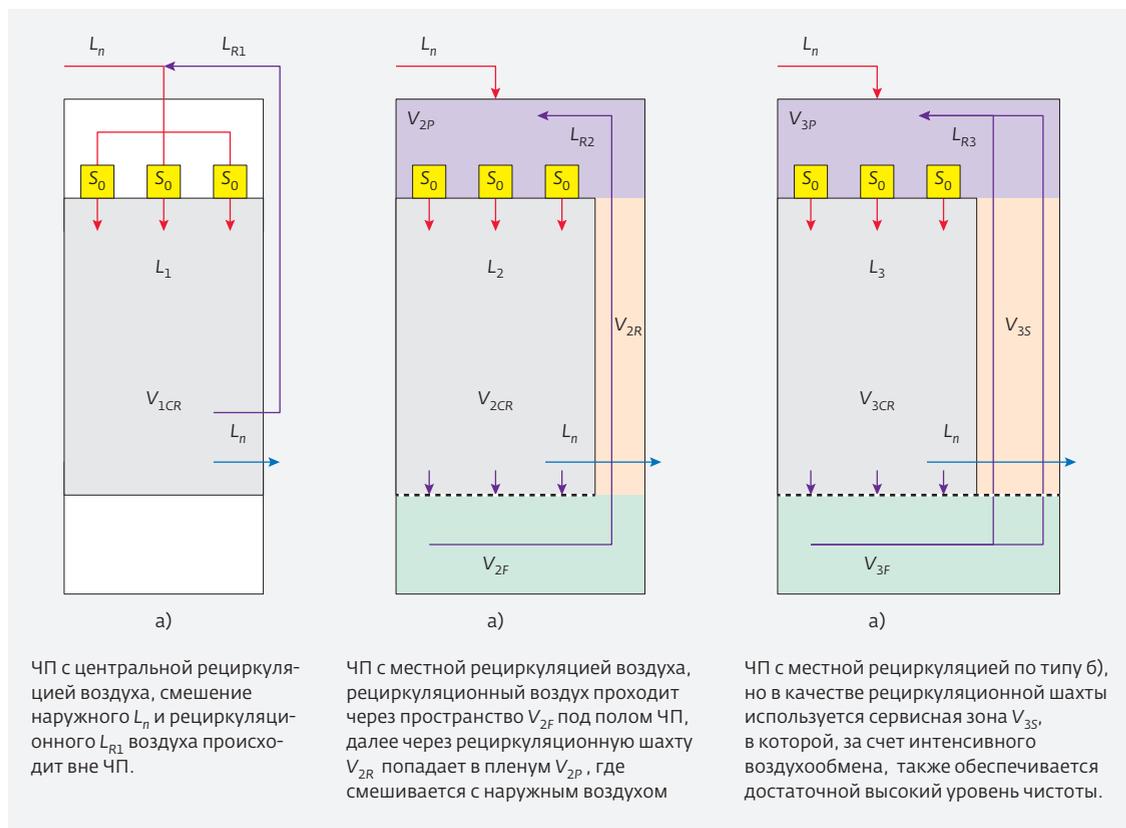


Рис. 5. Различные планы чистых помещений: а – по типу "танцзал" (ball-room), б – по типу "гребенка" (bay-to-chase)



**Рис. 6.** Различные типы чистых помещений по схемам воздухообмена.

чение кратности воздухообмена выполняться для любого по величине и расположению элемента объема рассматриваемого чистого помещения?" рассмотрим в следующем разделе.

**4. Конфигурация ЧП и всех объемов, входящих в тракт воздухообмена.** На рис. 6. представлены различные конфигурации чистых помещений. Эти конфигурации наиболее часто встречаются в современной практике проектирования и строительства чистых помещений для объектов промышленного назначения.

Выпишем некоторые зависимости:

- а.  $V_{1CR} = V_{2CR} = V_{3CR} = V$ ,  $L_{R1} = L_{R2} = L_{R3}$
- б. Для случая а):  $N_{m1} = N_{CR1} = (L_n + L_{R1}) / V_{1CR} = (L_n + L_{R1}) / V$ , где  $N_{m1}$  и  $N_{CR1}$  соответственно средняя кратность воздухообмена в чистом помещении (иными словами кратность воздухообмена в целом по помещению)\* и кратность воздухообмена в производственной зоне чистого помещения.
- с. Для случая б): При типовой высоте производственной зоны чистого помещения  $h = 3$  м (будем называть эту зону "чистым производственным

помещением" – ЧПП), высота фальшпола над основанием чистого помещения обычно 1,2 м, а высота пленума (расстояние от чистого потолка до внешнего потолка ЧП) порядка 1,8 м. Следовательно,  $V_{2P} + V_{2F} \approx V_{2CR}$ . Тогда общий объем чистого помещения типа б) будет примерно равен  $V_2 \approx 2V + V_{2R}$ . Как правило, площадь (а следовательно, и объем) рециркуляционных шахт не превышает 5-10% площади чистого помещения, и для оценки примем  $V_2 \approx 2,1V$ . Тогда  $N_{m2} = L_n / 2,1V \approx 0,48 N_{m1}$ , а  $N_{CR2} = (L_n + L_{R2}) / V = N_{CR1}$ , сохраняя условия задачи.

- д. Для случая с): Приняв, при тех же геометрических параметрах как в случае б), площадь сервисной зоны, примерно равной площади производственной зоны чистого помещения, то есть  $V_{3S} \approx V_{3CR}$ , оценим общий объем чистого помещения типа в) как  $V_3 \approx 4V$ . Тогда  $N_{m3} = L_n / 4V \approx 0,25 N_{m1}$ , а  $N_{CR3} = (L_n + L_{R3}) / V = N_{CR1}$ , также сохраняя условия задачи.

Из этого можно сделать вполне очевидные выводы:

- средняя кратность воздухообмена в помещении, как правило, не равна кратности воздухообмена в отдельных его объемах – составляющих элементах (в основном меньше);

\* Средняя кратность воздухообмена по помещению не есть классическая средняя от кратностей воздухообмена в отдельных объемах:  $N_m = \frac{L}{V} \approx \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k N_{mi}$ .

- организация рециркуляции воздуха внутри чистого помещения решает задачу повышения кратности воздухообмена в отдельных его объемах (например, для обеспечения чистоты в ЧПП) при относительно низкой кратности воздухообмена в целом по помещению;
  - при расчете кратности воздухообмена в ЧПП необходимо также предусмотреть необходимую кратность воздухообмена и в других элементах чистого помещения.
5. **Изменение объема ЧПП при его оснащении и эксплуатации** рассмотрим на типовом, то есть непременно происходящем в "жизни" чистого помещения процессе. Пусть ЧПП в состоянии "построенное" имеет объем  $V_b = D \times Ш \times B = 10 \times 10 \times 3 = 300 \text{ м}^3$ . Для такого помещения кратность воздухообмена  $N_b$  составит  $N_b = L/300$ .
  6. Наполним это помещение производственным оборудованием (типовое заполнение составляет 50% площади, средняя высота оборудования 2 м, то есть оборудование займет объем порядка  $100 \text{ м}^3$ ). Тогда свободный объем ЧПП в состоянии "оснащенное" составит  $V_r = 200 \text{ м}^3$ , а кратность воздухообмена  $N_r = L/200 = 3/2 N_b$ , то есть без внесения каких-либо изменений в систему воздухообмена, возрастет в 1,5 раза. Иными словами, при проведении расчетов инженерных систем, связанных с обеспечением кратности воздухообмена, необходимо учитывать фактор состояния чистого производственного помещения.
  7. **Нелинейная зависимость изменения объема подаваемого в ЧП воздуха с целью сохранения заданной кратности воздухообмена при изменении объема ЧП.** Пусть ЧП представляет собой параллелепипед. Тогда  $V_1 = xyz$ , где  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно длина, ширина и высота чистого помещения. Пусть  $\vartheta_1$  скорость, с которой воздух подается в ЧП через его потолок через единичную площадь, тогда объем подаваемого воздуха в единицу времени  $L_1 = x y \vartheta$ , а кратность воздухообмена соответственно составит  $N_1 = (\vartheta x y) / (x y z) = \vartheta_1 / z$ . При изменении размеров чистого помещения формулу расчета кратности воздухообмена надлежит переписать в виде  $N_2 = \{\vartheta_2 (x + \Delta x)(y + \Delta y)\} / \{(x + \Delta x)(y + \Delta y)(z + \Delta z)\} = \vartheta_2 / (z + \Delta z)$ . Для сохранения кратности воздухообмена в ЧП с изменившимися размерами необходимо, чтобы выполнялось равенство  $\vartheta_1 / z = \vartheta_2 / (z + \Delta z)$ , или  $\vartheta_2 = \vartheta_1 (z + \Delta z) / z = \vartheta_1 (1 + \Delta z / z)$ . Иными словами, если площадь чистого помещения изменяется, но высота его при этом сохра-

няется ( $\Delta z = 0$ ), то для сохранения кратности воздухообмена скорость подачи воздуха на единицу площади не изменится, но его общее количество увеличится пропорционально увеличению площади. Если же меняется и высота чистого помещения, то необходимо увеличить и скорость подачи воздуха на единицу площади пропорционально изменению высоты, отнесенной к исходной высоте чистого помещения ( $\Delta z / z$ ), и, конечно, учесть изменение общей площади чистого помещения.

8. **Выводы и заключения.** Подведем итоги вышесказанному.

Расчет системы вентиляции чистого помещения надо вести по критическим параметрам – поддержание заданного класса чистоты, обеспечение инсталлированной в ЧП технологии (влажность и температура воздуха, мощность местных отсосов воздуха и др.), скорость купирования загрязнений и т.п.

Показатель "кратность воздухообмена" получается на самом деле чисто механическим делением величины объема воздуха, подаваемого в чистое помещение и рассчитанного из выше-названных факторов, на объем этого помещения, который также определяется в процессе проектирования чистых помещений. Другими словами, этот показатель (объем помещения) вторичный, и сам по себе не может применяться ни в качестве исходного требования, ни в качестве целевого параметра.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. **Красников Г.Я.** Исследование влияния материала верхнего электрода на свойства мдп структур // Дис. на соиск. уч. ст. канд. тех. наук. – М.: МИЭТ, 1989.
2. **Красников Г.Я.** Физико-технологические принципы и методы обеспечения качества КМОП БИС массового производства // Дис. на соиск. уч. ст. д. тех. н. – М.: МИЭТ, 1996.
3. ГОСТ Р ИСО 14644-4-2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 4. Проектирование строительство и ввод в эксплуатацию.
4. Чистые помещения и технологические среды. 2012. № 2(42). С. 24–39.
5. Чистые помещения и технологические среды. 2012. № 3(43). С. 14–26.
6. ГОСТ 56190-2014. Чистые помещения. Методы энергосбережения.

### DSA – КОМПЛЕМЕНТАРНЫЙ МЕТОД УСИЛЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ИММЕРСИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ

За последние несколько лет инновационные методы формирования изображения достигли значительного прогресса. На протяжении десятилетий EUV-литография (extreme ultraviolet) являлась главным кандидатом на усиление разрешающей способности оптической литографии. Этот метод уже сейчас применяется для изготовления пилотных партий как дополнение к иммерсионной литографии. К 2020 году планируется его полное освоение с минимальными проектными нормами 7–5 нм, причем для разрешения 5 нм будет использоваться однократная EUV-литография. Однако даже в этой перспективе не все производители смогут позволить себе использование этой технологии. В то же время альтернативные, или так называемые комплементарные, как для EUVL, так и для иммерсионной литографии, методы усиления разрешения также стремительно развиваются. Метод направленной самосборки (directed self-assembly, DSA) демонстрирует значительный прогресс в развитии, а также в решении проблем по уменьшению дефектности, интеграции в топологию, оптимизации маршрутов. Многолучевая электронная литография (multi-beam electron lithography, ML2) также медленно, но прогрессирует в решении проблем, связанных с надежностью и стабилизацией основных точностных параметров.

**Ключевые слова:** направленная самосборка (directed self-assembly, DSA), EUV-литография (extreme ultraviolet), многолучевая электронная литография (multi-beam electron lithography, ML2), иммерсионная литография, новое поколение литографии (NGL), мультипаттернирование, блок-сополимер, параметр взаимодействия  $\chi$ , закрепляющий слой, нейтральный слой, хемозпитаксия, графоэпитаксия

#### Сведения об авторах:

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

Гушин Олег Павлович; Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, ogushin@mikron.ru;

Литаврин Михаил Владимирович; Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, mlitavrin@mikron.ru;

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

### МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕДЬ-УГЛЕРОДНЫХ КОМПЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Исследованы композиционные покрытия из невазаимодействующих между собой металлургическим путем меди и углерода. Покрытия получали методом высокоскоростного ионно-плазменного магнетронного распыления (ВИПМР) с использованием составных мозаичных мишеней (ММ). Экспериментально показано, что метод ВИПМР позволяет эффективно распылять с одинаковой установившейся скоростью такие разнородные материалы, как медь и углерод в заранее заданной пропорции. При этом формируется поток атомов меди и углерода, гомогенно смешанных между собой на атомарном уровне. Поток меди и углерода осаждается на подложке в виде двухкомпонентного композиционного покрытия заданного состава на макроуровне. Установлено, что на поверхности подложки формируется покрытие, состоящее из медной и углеродной фаз наноразмерного диапазона типа ядро-оболочка. Кристаллическая дисперсность покрытия изменяется в зависимости от содержания в композите углерода. В зависимости от процентного содержания меди и углерода на подложке происходит формирование различных наночастиц и соответствующее наноструктурирование композита. Исследование фазового и элементного состава, микроструктуры, топографии поверхности, микротвердости, коэффициента трения и других характеристик получаемых наноструктурированных покрытий показывает, что медь и углерод в процессе осаждения на подложку, нагретую до 350–450 °С, на наноразмерном уровне взаимно не смешиваются и химически не взаимодействуют, но процентное содержание нанокристаллитов в композите существенно влияют на свойства композита. Концентрация углерода оказывает существенное влияние на шероховатость поверхности, адгезию, механические, электрические и трибологические свойства. Так при содержании 10–15% (ат.) углерода наблюдается снижение коэффициента сухого трения покрытия до 0,1, а износостойкость  $< 10^{-17}$  м<sup>3</sup>/Н·м. Полученные экспериментальные результаты качественно объясняются захватом свободных электронов наноструктурами углерода и формированием слоев объемного заряда.

**Ключевые слова:** Cu-C нанокompозит, управление свойствами нанокompозитов, коэффициент сухого трения, износостойкость

#### Сведения об авторах:

Висыкало Филипп Иванович, д. ф.-м. н.; Акционерное общество «Московский радиотехнический институт РАН», 117519, Россия, Москва, Варшавское шоссе, д. 132, filvys@yandex.ru;

Митин Валерий Семёнович, к. т. н.; Открытое акционерное общество «Высоко-технологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А.А. Бочвара», 123098, Москва, ул. Рогова, д.5а, mitin2@mail.ru;

Яковлев Александр Юрьевич; Акционерное общество «Московский радиотехнический институт РАН», 117519, Россия, Москва, Варшавское шоссе, д. 132, iesakov@yandex.ru;

Беляев Виктор Васильевич, д. т. н., профессор; Московский государственный областной университет, 105005, г. Москва, ул. Радио д. 10 а, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов», 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, vic\_belyaev@mail.ru

### DSA – COMPLEMENTARY METHOD OF ENHANCING RESOLUTION OF IMMERSION LITHOGRAPHY

Over the past few years, novel lithography techniques have made a significant progress. For deAcades, the EUV-lithography (EUV) has been a prime candidate to enhance the resolution of optical lithography. This method is already used for the producing of pilot batches, together with immersion lithography. By 2020 it is planned to complete the development of a "7–5 nm node", and "5 nm node" designs will be made by single EUV lithography. However, even in this perspective, not all manufacturers will be able to afford using this technology. At the same time, alternative or complementary for EUVL and for immersion lithography, resolution enhancing techniques have also been rapidly developing. The method of directed self-assembly (DSA) shows significant progress in its development and in addressing the remaining challenges to reduce defects, design integration, as well as route optimization. Multi-beam electron lithography (ML2) also achieved significant progress in addressing the problems associated with the reliability and accuracy stabilization of the main parameters.

**Keywords:** directed self-assembly (DSA), extreme ultraviolet lithography (EUV), multi-beam electron lithography (ML2), immersion lithography, next generation lithography (NGL), multi-patterning (MP), block copolymer, interaction parameter  $\chi$ , mat, brush, graphoepitaxy, chemoepitaxy

#### Data of authors:

Krasnikov Gennady Yakovlevich, Dr.Sci.; RAS academician; Molecular Electronic Research Institute SC, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadnyy proezd, d. 12/1, gkrasnikov@mikron.ru;

Gushchin Oleg Pavlovich; Molecular Electronic Research Institute SC, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadnyy proezd, d. 12/1, ogushin@mikron.ru;

Litavrin Michail Vladimirovich; Molecular Electronic Research Institute SC, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadnyy proezd, d. 12/1, mlitavrin@mikron.ru;

Gornev Evgeny Sergeevich, doctor of Engineering Sciences; Molecular Electronic Research Institute SC, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadnyy proezd, d. 12/1, egornev@mikron.ru.

### COOPER-CARBON NANOSTRUCTURED COMPOSITE COATINGS WITH CONTROLLED STRUCTURE

Studied Cu-C-composite. Coatings were produced by high ion plasma magnetron sputtering (HIPMS) using a composite mosaic target. It is shown experimentally that the HIPMS method can effectively spraying with the same steady rate of such diverse materials as copper and carbon in predetermined proportions. In this case, it is formed by the flow of copper and carbon, is homogeneously mixed with each other at the atomic level. The flow of copper and carbon is deposited on the substrate in the form of two-component composite coating of given composition at the macro level. Studies have shown that at the nanoscale on the substrate is formed nanophases and related nanostructuring of the composite. The phase and elemental composition, microstructure, surface topography, microhardness, friction coefficient and other characteristics of the nanostructured coating shows that the copper and carbon in the process of deposition on a substrate heated to 350–450 °C, at the nanoscale are not mutually mixed and not chemically interact. On the surface of the substrate coating is formed, consisting of copper and carbon nanosize range of phases. The crystal dispersion coating varies depending on the content of carbon in the composite. The carbon concentration has a significant influence on surface roughness, adhesion and mechanical, electrical and tribological properties. So if they contain 10–15% (at.) carbon is observed decline in the dry-friction coating to 0,1–0,15. The mechanical properties can be explained by free electrons capture with carbon nanostructures and space charge formation.

**Keywords:** Cu-C Nanocomposite, Coatings, Hardness, Friction Coefficient, X-Ray Diffraction, Raman Spec-troscopy

#### Data of authors:

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

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

Yakovlev Alexandr Yurievich; The Moscow Radiotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, (MRTI RAS), 117519, Russia, Moscow, Warsaw highway, 132, iesakov@yandex.ru;

Belyaev Victor Vasilevich, Doctor of technical science; Moscow Region State University, Professor, Peoples' Friendship University of Russia, 117198, Russia, Moscow, Miklukho-Maklaya street, 6, vic\_belyaev@mail.ru

### СВОЙСТВА БУФЕРНОГО ТРАВЛЕТЕЛЯ ОКСИДА КРЕМНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

В данной работе рассматриваются свойства буферного травителя оксида кремния и особенности его использования в технологии изготовления интегральных схем. Показаны причины использования буферного травителя для травления оксида кремния с маской фоторезиста, рассмотрено влияние концентраций компонентов на поведение самого травителя и действие на поверхность пластины.

**Ключевые слова:** буферный травитель, BOE, BHF, травление, оксид кремния, селективность

#### Сведения об авторах:

Ранчин Сергей Олегович, Публичное акционерное общество «Микрон», 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1, e-mail: sranchin@mikron.ru;

Кiryushina Ирина Васильевна, Публичное акционерное общество «Микрон», 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1, e-mail: ikiryushina@mikron.ru

### ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ФОТОРЕЗИСТ ДЛЯ ВЗРЫВНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Для технологии металлизации полупроводниковых пластин методом «взрывной» литографии разработан негативный фоторезист ФН-16У-7 - аналог импортного фоторезиста AZ nLOF 2070. Фоторезист работает на принципе «химического усиления», и в своем составе дополнительно содержит компонент, способствующий формированию отрицательного угла наклона маски фоторезиста. Продемонстрировано, что путем изменения концентрации этого компонента в негативном фоторезисте можно контролировать его профиль фоторезистивной маски.

**Ключевые слова:** негативный фоторезист; металлизация; «взрывная» литография

#### Сведения об авторах:

Кузнецова Нина Александровна, д.х.н.; Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научный центр «Научно-исследовательский институт органических полупроводников и красителей», 123001, г. Москва, ул. Большая Садовая, д. 1 корп. 4, lab32@niopik.ru;

Эрlich Рoальд Давидович, к.х.н.; Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научный центр «Научно-исследовательский институт органических полупроводников и красителей», 123001, г. Москва, ул. Большая Садовая, д. 1 корп. 4, lab32@niopik.ru;

Соловьев Виктор Васильевич, к.ф.-м.н.; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики твердого тела» Российской академии наук, 142432, Черноголовка, Московская область, ул. Лесная, д. 9, vicsol@issp.ac.ru

### ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ТЕХНОЛОГИИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА: ЧАСТЬ 1. УРОВНИ ОПИСАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Приводится обзор существующих подходов к пониманию и описанию технологических процессов (технологии). На их фоне формулируется авторская концепция «общей теории технологий» как раздела общей теории систем. Указывается место микроэлектроники в истории и современном древе технологий.

**Ключевые слова:** общая теория систем, кибернетика, критические технологии, технология, технологический процесс, научно-технический прогресс, технологический уклад, инновации

#### Сведения об авторах:

Красников Геннадий Яковлевич, д.т.н., академик Российской академии наук; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.12/1, gkrasnikov@mikron.ru;

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

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

### ОСОБЕННОСТИ ПОНЯТИЯ «КРАТНОСТЬ ВОЗДУХООБМЕНА» ПРИМЕНительно К ЧИСТЫМ ПОМЕЩЕНИЯМ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Настоящая работа посвящена оценке одной из основных характеристик чистых помещений, предназначенных для производства ИМС, так называемой кратности воздухообмена в помещении. Рассмотрены факторы, существенно влияющие на величину этой характеристики. Показано, что она все же является вторичной по отношению к более важной характеристике – объему воздуха, подаваемого в единицу времени на единичную площадь рабочей зоны чистого помещения. Затронутые в статье вопросы нуждаются в более детальном освещении, что планируется сделать в последующих публикациях.

**Ключевые слова:** кратность воздухообмена, интенсивность подачи кондиционного воздуха в чистое помещение

#### Сведения об авторах:

Маркин Александр Викторович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, РФ, Москва, Зеленоград, 1-ый Западный проезд, д. 12, стр. 1, almarkin@mikron.ru

### BUFFERED OXIDE ETCHER PROPERTIES AND USAGE FEATURES IN THE INTEGRATED CIRCUITS TECHNOLOGY

Buffered oxide etcher properties and usage features in the integrated circuits technology are considered in this publication. Buffered oxide etcher for silicon oxide with photoresist mask etching usage reasons are shown, componentry concentrations impacting on the etcher behavior and impact on wafer surface was considered.

**Keywords:** buffered etcher, BOE, BHF, etching, silicon oxide, selectivity

#### Data of authors:

Krasnikov Gennadiy Yakovlevich, Dr.Sci.; RAS academician; Molecular Electronic Research Ranchin Sergey Olegovich, "Micron" Public joint stock company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: sranchin@mikron.ru;

Kiryushina Irina Vasilievna, "Micron" Public joint stock company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: sranchin@mikron.ru

### DOMESTIC PHOTORESIST FOR LIFT-OFF PHOTOLITHOGRAPHY

Negative i-line photoresist FN-16U-7 is analogous to AZ nLOF 2070 and formulated for lift-off lithography processes to create metallic interconnections on semiconductor substrates. FN-16U-7 uses the "chemical amplification" concept and contains an additional special component to promote the formation of a negative wall profile. It was demonstrated that by changing the component concentration one may finely tune the negative mask tilt.

**Keywords:** negative photoresist; metallization; lift-off lithography

#### Data of authors:

Kuznetsova Nina Aleksandrovna, doctor of chemical Sciences; Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Center" Scientific Research Institute of Organic Intermediates and Dyes", B. Sadovaya 1/4, Moscow, 123995 Russia, lab32@niopik.ru;

Erlch Roald Davidovich, PhD in Chemistry; Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Center" Scientific Research Institute of Organic Intermediates and Dyes", B. Sadovaya 1/4, Moscow, 123995 Russia, lab32@niopik.ru;

Solovyyev Victor Vasilievich, PhD in Physics; Institute of Solid State Physics, Chernogolovka, Moscow District, 2 Academician Ossipyan str., 142432 Russia, vicsol@issp.ac.ru

### GENERAL THEORY OF TECHNOLOGY AND MICROELECTRONICS: PART 1. LEVELS OF TECHNOLOGY

A review of existing approaches to understanding and describing technological processes (technology) is given. Taking into account these approaches the author's conception of the "General Theory of Technology" is stated as a part of the General Systems Theory. The place of microelectronics in history and modern technology tree is indicated.

**Keywords:** general systems theory, cybernetics, general purpose technologies, technology, technological process, scientific and technological progress, technological structure, innovations

#### Data of authors:

Krasnikov Gennadij Yakovlevich, Doctor of Engineering Sciences; Stock Company Molecular Electronic Research Institute; d. 12/1, 1-st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russian Federation, 124460, gkrasnikov@mikron.ru;

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

Matushkin Igor Valerevich. Dr.Ph. National Research University of Electronic Technology, Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, Stock Company Molecular Electronic Research Institute; d. 12/1, 1-st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russian Federation, 124460, imatushkin@mikron.ru

### ABOUT THE FEATURES OF THE CONCEPT "VENTILATION RATE", IN RELATION TO CLEAN ROOMS FOR PRODUCTION PURPOSES

The article is dedicated to one of the main characteristics of the clean rooms that intended for the production of IMS – the so-called ventilation rate in the room. This paper examines factors significantly affecting the value of this characteristic. It is shown that however it is secondary to the more important characteristic that is the volume of air supplied in unit time on unit area of the working area of a clean room. Issues raised in the article need in more detailed coverage of that is planned to do in subsequent publications.

**Keywords:** ventilation rate, the flow rate of conditioned air to the clean room

#### Data of authors:

Markin Alexandr Viktorovich, «Molecular Electronic Research Institute», Stock Company, d. 12/1, 1-y Zapadny proezd Zelenograd, Moscow, Russian Federation, 124460, almarkin@mikron.ru