

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 3 (171) 2018

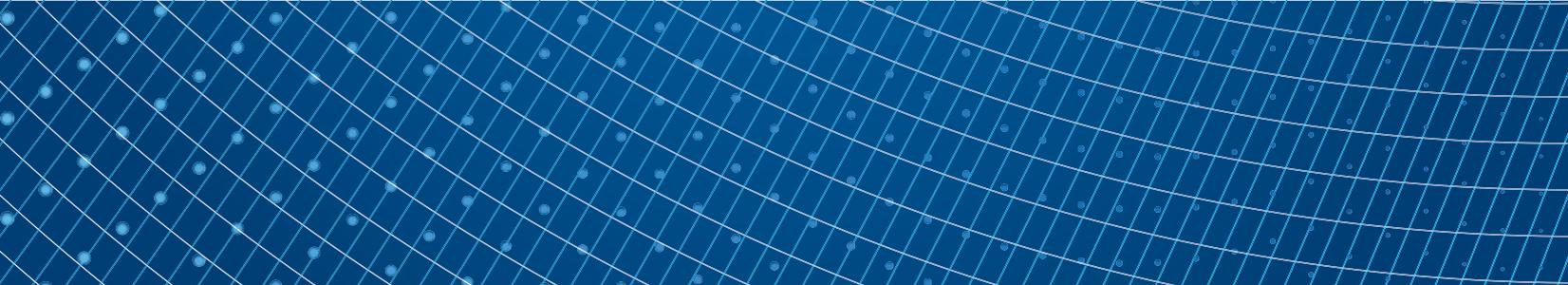
ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Issue 3 (171) 2018

Москва, 2018



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

Редакционный совет
Главный редактор
Красников Г. Я., д. т. н.,
академик РАН

Члены редакционного совета

В. В. Аристов,
член-корреспондент РАН
Асеев А. Л., д. ф.-м. н.,
академик РАН
Бетелин В. Б., д. ф.-м. н.,
академик РАН
Бокарев В. П., к. х. н.,
ответственный секретарь
Бугаев А. С., д. ф.-м. н.,
академик РАН
Быков В. А., д. т. н.
Галиев Г. Б., д. ф.-м. н.
Горбачевич А. А., д. ф.-м. н.,
член-корреспондент РАН
Горнев Е. С., д. т. н.,
зам. главного редактора
Грибов Б. Г., д. х. н.,
член-корреспондент РАН
Зайцев Н. А., д. т. н.
Ким А. К., к. т. н.
Критенко М. И., к. т. н.
Немудров В. Г., д. т. н.
Петричкович Я. Я., д. т. н.
Сигов А. С., д. ф.-м. н.,
академик РАН
Стемпковский А. Л., д. т. н.,
академик РАН
Чаплыгин Ю. А., д. т. н.,
академик РАН
Шелепин Н. А., д. т. н.,
зам. главного редактора
Эннс В. И., к. т. н.

Адрес редакции

📍 124460 г. Москва, Зеленоград,
1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1
☎ +7 495 229-70-43
✉ journal_EEM-3@mikron.ru
🌐 www.niime.ru/
zhurnal-mikroelektronika
Журнал издается с 1965 года

Учредитель

АО «Научно-исследовательский
институт молекулярной
электроники»

Слово редактора 4

Физические явления

В. В. Аристов, А. В. Никулов
О возможности использования энергии устойчивого тока для
создания квантового источника мощности 5–16

Л. С. Успенская
Переключение спин-поляризованным током гибридных
структур на базе пермаллоя 17–22

Г. В. Баранов, А. Г. Итальянцев, К. Д. Щербачев
Эффект разделения компонентов пар Френкеля при ионной
имплантации структур $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 23–28

Разработка и конструирование

М. А. Королев, А. Ю. Красюков, Т. Ю. Крупкина, Ю. А. Чаплыгин
Влияние расположения и глубины контактов к стоку / истоку на
параметры 3D беспереходного МОП-транзистора 29–36

А. С. Шалимов
Способ удаления случайной постоянной составляющей
из входного сигнала в условиях сильного зашумления
и априорной неопределенности 37–43

Процессы и технология

Ф. И. Высикайло, В. С. Митин, А. А. Якушкин, В. В. Беляев
Физическое легирование для управления нанокристаллической
структурой и свойствами многофазных композитных металл-
углеродных покрытий на базе карбидов 44–58

Свойства материалов

М. М. Афанасьев, Н. А. Кузнецова, Т. В. Чальцева
Использование негативных фоторезистов серии ФН-16У для
получения металлической маски из тугоплавких металлов 59–62

Математическое моделирование

Г. Я. Красников, Е. С. Горнев, И. В. Матюшкин
Общая теория технологии и микроэлектроника:
Часть 3. Уровень технологической операции 63–93

Квантовые компьютеры

А. В. Белинский
О квантовом телеграфе 94–97

Памяти члена-корреспондента РАН

В. В. Аристова 98

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

“ELECTRONIC ENGINEERING. Series 3. MICROELECTRONICS”

Editorial Council

Chief Editor

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

The Members of Editorial Council

V.V. Aristov, 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 Yu. A., Sc. D., Full Member of the RAS

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

Enns V. I., Ph.D.

Editorial Staff Address

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

+7 495 229-70-43

journal_EEM-3@mikron.ru

www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

The journal is published since 1965

Founder

“Molecular Electronics Research Institute” Stock Company

Editor’s Column 4

Physical phenomena

V. V. Aristov, A. V. Nikulov

About possibility of use of energy of the persistent current for making of a quantum power source 5–16

L. S. Uspenskaya

Spin-polarized current switching of permalloy based hybrid structures 17–22

G. V. Baranov, A. G. Italyantsev, K. D. Shcherbachev

The effect of Frenkel pairs components separation during ion implantation into SiO₂-Si structure 23–28

Development and designing

M. A. Korolev, A. Yu. Krasukov, T. Yu. Krupkina, Yu. A. Chaplygin

Influence of the spacer length and contact depth on the 3D junctionless MOSFET characteristics 29–36

A. S. Shalimov

Method of elimination of the constant random component from the input signal with small signal-to-noise ratio under prior uncertainty conditions 37–43

Processes and technology

P. I. Vysikaylo, V. S. Mitin, A. A. Yakushkin, V. V. Belyaev

Physical doping for control of nanocrystalline structure and properties of multiphase composite metal-carbon coatings on the basis of transition metal carbides 44–58

Properties of materials

M. M. Afanasyev, N. A. Kuznetsova, T. V. Chaltseva

The use of negative photoresists FN-16U series to produce a metal mask of refractory metals 59–62

Mathematical simulation

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

General theory of technology and microelectronics: Part 3. Technological operation level 63–93

Quantum computers

A. V. Belinsky

On the quantum telegraph 94–97

In memory of the corresponding member of the RAS V. V. Aristov 98

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

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Вашему вниманию предлагается очередной, 171-й выпуск научно-технического издания «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника».

В каждом новом выпуске мы с вами будем говорить о реальных проблемах микро- и наноэлектроники, обсуждать их с экспертами и искать правильные пути решения актуальных научных задач на фундаментальном уровне.

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

В разделе «Физические явления» рассматриваются экспериментальные результаты исследования асимметричного кольца, свидетельствующие о том, что при определенных условиях оно является источником мощности постоянного тока. Данная статья заслуживает особого внимания научного сообщества, поскольку была написана в соавторстве с известным российским ученым, членом-корреспондентом РАН Виталием Васильевичем Аристовым, безвременно скончавшимся 29 июля 2018 года.

Кроме того, данный раздел представлен статьей, в которой обсуждается возможность практического использования эффектов смещения доменных границ током в полосковых структурах, а также работой, посвященной исследованиям особенностей накопления первичных радиационных дефектов на границе $\text{SiO}_2\text{-Si}$.

В разделе «Разработка и конструирование» описаны результаты исследования средствами TCAD влияния расположения контактных областей и их глубины на основные параметры 3D двухзатворного беспереходного МОП-транзистора. Кроме того, приведена статья по способу выделения полезного сигнала, поступающего с первичных преобразователей физических величин в условиях сильного зашумления.



В следующем разделе «Процессы и технология» рассмотрены методы управления свойствами и нанокристаллической структурой многофазных композитных металл-углеродных покрытий с использованием физического легирования.

Раздел «Свойство материалов» представлен статьей, в которой показано, что «взрывная» фотолитография с использованием фоторезиста серии ФН-16У позволяет производить качественную металлизацию подложек тугоплавкими металлами (Pt) без использования установок ионно-лучевого травления.

В разделе «Математическое моделирование» представлена третья часть работы «Общая теория технологии и микроэлектроника», в которой рассматривается специфика биологических и социальных технологий, а также выявлены общие тенденции эволюции технологических операций микроэлектроники.

Заключительный раздел «Квантовые компьютеры» представлен анализом особенностей ограничения степеней свободы случайных процессов, протекающих в квантовых замкнутых системах.

*С уважением,
главный редактор журнала,
академик РАН,*

Г. Я. Красников

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ УСТОЙЧИВОГО ТОКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ КВАНТОВОГО ИСТОЧНИКА МОЩНОСТИ

► **В. В. Аристов, А. В. Никулов**
ИПТМ РАН

Обычный электрический ток быстро затухает в кольце при наличии сопротивления и отсутствии электродвижущей силы. Но устойчивый ток, квантовое явление, наблюдающееся в кольцах из сверхпроводников, нормальных металлов и полупроводников благодаря квантованию Бора и эффекту Ааронова – Бома, не затухает сколь угодно долго при этих условиях. Было обнаружено, что устойчивый ток, как и обычный круговой ток, создает постоянную разность потенциалов, когда асимметричное кольцо или его сегменты переключаются между сверхпроводящим и нормальным состояниями. Данный экспериментальный результат однозначно свидетельствует о том, что асимметричное кольцо при определенных условиях является источником мощности постоянного тока. Предлагается использовать систему асимметричных сверхпроводящих колец в качестве рабочего источника постоянного тока в случае, когда кольца переключаются неравновесными тепловыми шумами.

ABOUT POSSIBILITY OF USE OF ENERGY OF THE PERSISTENT CURRENT FOR MAKING OF A QUANTUM POWER SOURCE

V. V. Aristov, A. V. Nikulov
IMT RAS

An electric current induced in a resistive circuit will rapidly decay in the absence of an applied voltage. But the persistent current, quantum phenomenon observed in rings of superconductors, normal metals and semiconductors due to the Bohr quantization and the Aharonov-Bohm effect does not decay any long time under these conditions. It was discovered that the persistent current, like conventional circular current, induces a DC voltage when the asymmetric ring or its segments are switched between superconducting and normal states. This experimental result clearly suggests that the asymmetric ring is a DC power source under certain conditions. It is proposed to use the system of asymmetric superconducting rings as a working DC source in the case when the rings are switched by non-equilibrium thermal noise.

ВВЕДЕНИЕ

В докладе [1], представленном на первой конференции по квантовой информатике, было предложено использовать новый квантовый эффект, обнаруженный [2] в ИПТМ РАН, для создания источника мощности постоянного тока. При температуре, несущественно меньшей температуры сверхпроводящего

перехода, на асимметричном кольце из алюминия наблюдалась постоянная разность потенциалов $V_{dc}(\Phi)$, знак и величина которой периодически изменяется с изменением магнитного поля B при периоде $B_0 = \Phi_0/S$, соответствующем кванту магнитного потока $\Phi_0 = 2\pi\hbar/q = h/q \approx 20,7$ Э мкм² внутри кольца площадью $S = \pi r^2$ [2]. Здесь $q = 2e$ – заряд пары

электронов $\hbar = h/2\pi$ – константа Планка. С одной стороны, наблюдение такого эффекта могло быть ожидаемым, так как было известно, что в сверхпроводящих кольцах течет незатухающий ток I_p , известный как устойчивый ток (persistent current). Этот постоянный ток наблюдается когда постоянный во времени магнитный поток $\Phi = BS$ внутри кольца не кратен $\Phi \neq n\Phi_0$ кванту потока. Хорошо известно, что на половинках кольца с разным сопротивлением наблюдается разность потенциалов

$$V = 0,5(R_n - R_w)I, \quad (1)$$

когда по кольцу течет ток I . Сопротивление может быть разным $R_n = \rho 0,5l/s_n > R_w = \rho 0,5l/s_w$, например, вследствие разного сечения $s_w > s_n$ половинок. Половинка кольца с меньшим сопротивлением R_w является источником мощности, так как ток I в ней течет против разности потенциалов V . Эффект, обнаруженный в [2], свидетельствует о том, что одна половинка асимметричного сверхпроводящего кольца может быть источником мощности постоянного тока, так как устойчивый ток I_p в ней течет против разности потенциалов V_{dc} . Обычный круговой электрический ток может течь, не затухая, в кольце с ненулевым сопротивлением $R_r = R_n + R_w$ только при наличии электродвижущей силы Фарадея $(R_n + R_w)I = -d\Phi/dt$. В этом случае ток течет против потенциального электрического поля $E = -\nabla V$ в одной половинки, но его направление соответствует направлению полного электрического поля $E = -\nabla V - dA/dt$ в обеих половинках. При этом выполняется закон Ома $j\rho = E = -\nabla V - dA/dt$ и есть баланс сил: сила $F_E = qE$ электрического поля $E = -\nabla V - dA/dt$, действующая на электроны, уравнивается $F_E + F_{dis} = 0$ силой диссипации F_{dis} при $dI/dt = 0$. Но устойчивый ток I_p наблюдается в магнитном поле, постоянном во времени $d\Phi/dt = 0$. Поэтому наблюдение постоянной разности потенциалов [2] означает, что устойчивый ток течет, не затухая, против действия постоянного электрического поля в одной из половинок кольца (рис. 1). В этом случае отсутствует баланс известных сил.

Несмотря на эту парадоксальность [3], постоянное напряжение, знак и величина которого изменяются в магнитном поле подобно средней величине устойчивого тока, наблюдалось во многих работах [4-12]. Возможность использования этого парадоксального эффекта для создания источника мощности постоянного тока с величинами напряжения и мощности, достаточными для практического применения, основана на суммировании мощности и напряже-

ния в системе последовательно соединенных одинаковых асимметричных колец, что подтверждено экспериментально [6]. Напряжение и мощность могут легко суммироваться благодаря тому, что в сверхпроводящих кольцах одинакового диаметра устойчивый ток имеет одинаковое направление в данном магнитном поле. В соответствии с этим напряжение имеет одинаковый знак в одинаково асимметричных кольцах. Это позволяет получить достаточно большое напряжение и мощность на системе с достаточно большим числом колец.

Возможные величины напряжения и мощности будут оценены в третьем разделе. Перед этим мы считаем необходимым рассмотреть условия, при которых наблюдается устойчивый ток, и почему он не затухает. Это будет сделано в следующем разделе. В данной работе мы обращаем внимание на возможность использования для получения мощности постоянного тока неравновесных тепловых шумов, мощность которых передается по проводам от комнатной температуры в низкотемпературную часть измерительной системы. Эта возможность рассматривается в третьем разделе. Тем не менее мы не исключаем возможность того, что постоянное напряжение может быть индуцировано равновесными шумами. Эта возможность будет рассмотрена в четвертом разделе.

ПОЧЕМУ УСТОЙЧИВЫЙ ТОК НЕ ЗАТУХАЕТ?

Устойчивый ток наблюдается благодаря квантованию Бора и эффекту Ааронова – Бома, проявляющемуся в зависимости скорости мобильных носителей заряда в кольце от вектор потенциала A .

Дискретность спектра состояний

Для объяснения стационарности орбит электрона в атоме, Бор постулировал в 1913 году квантование момента импульса $m_p = rp = r m v$ электронов, т. е. дискретность спектра его разрешенных значений $m_p = n\hbar$. Квантование Бора применимо также для описания квантовых эффектов, наблюдаемых в мезоскопических и сверхпроводящих кольцах. Квантование момента импульса

$$m_p = \oint_1 dl sr \Psi^* \hat{P}_l \Psi = \oint_1 dl sr \Psi^* (-i\hbar \frac{\partial}{\partial l}) \Psi = sr |\Psi|^2 \hbar \oint_1 dl \frac{\partial \varphi}{\partial l} = n\hbar \quad (2)$$

может быть выведено в этом случае из требования однозначности $\oint_1 dl \partial \varphi / \partial l = n2\pi$ волновой функции в любой точке окружности $l = 2\pi r$: $\Psi = |\Psi| e^{i\varphi} = |\Psi| e^{i(\varphi + n2\pi)}$. Дискретность спектра электронов в кольце, например радиусом $r \approx 0,5$ мкм, много меньше чем в атоме,

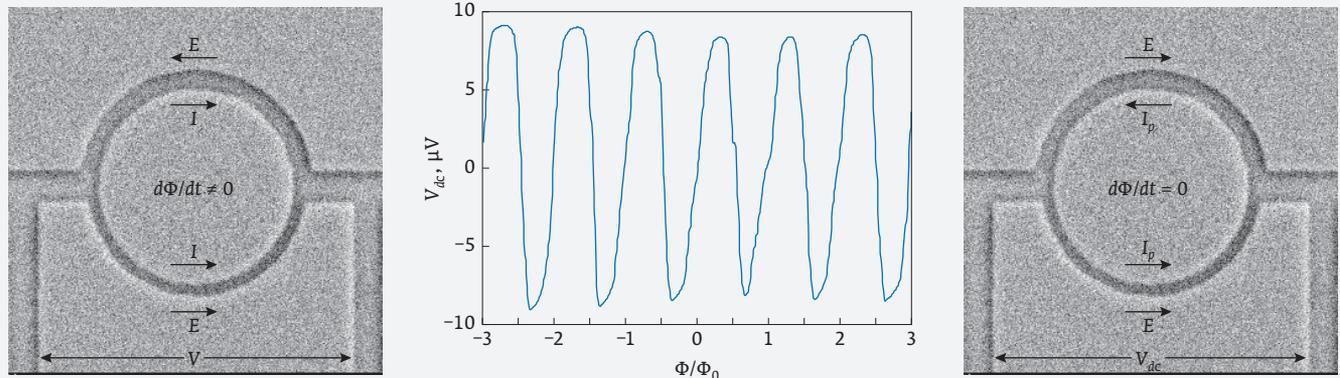


Рис. 1. Слева показано, что в случае обычного электрического тока I , создаваемого и поддерживаемого электрическим полем Фарадея $(R_n + R_w)I = -d\Phi/dt$, направление тока соответствует направлению электрического поля $E = -\nabla V - dA/dt$ в обеих половинках асимметричного кольца с $R_n > R_w$. В центре приведен пример осцилляций постоянного напряжения в магнитном поле $V_{dc}(\Phi)$, наблюдавшихся в [4–12] при измерениях асимметричных сверхпроводящих колец. Ненулевое напряжение V_{dc} наблюдается при магнитном потоке внутри кольца $\Phi \neq n'\Phi_0$ и $\Phi \neq (n' + 0,5)\Phi_0$, постоянном во времени $d\Phi/dt = 0$. Рисунок справа показывает, что данный экспериментальный результат свидетельствует о парадоксе. Устойчивый ток течет, не затухая, против действия силы постоянного электрического поля $E = -\nabla V$ в одной из половинок кольца. Показаны фото реального алюминиевого кольца радиусом $r = 2 \mu\text{м}$, на котором наблюдались квантовые осцилляции $V_{dc}(\Phi)$

так как разность кинетических энергий между разрешенными уровнями

$$\Delta E_{n+1,n} = \frac{mv_{n+1}^2}{2} - \frac{mv_n^2}{2} \approx \frac{\hbar^2}{2mr^2} \quad (3)$$

обратно пропорциональна квадрату радиуса. В сверхпроводящем кольце дискретность намного больше за счет того, что все куперовские пары не только находятся на одном уровне, будучи бозонами, но и не могут двигаться индивидуально, то есть переходить индивидуально на уровень с другим квантовым числом n . В кольце радиусом r и сечением s находится $N_q = Vn_q = 2\pi rsn_q$ пар с общей массой $M = N_q m$. Так как весь этот сверхпроводящий конденсат движется как одна большая частица, в выражение для кинетической энергии входит большая масса $M = N_q m$. С другой стороны в выражение $v_n = n\hbar/mr$ для разрешенных значений скорости входит масса одной пары. Поэтому разность энергий между разрешенными уровнями сверхпроводящего кольца

$$\Delta E_{n+1,n} = \frac{Mv_{n+1}^2}{2} - \frac{Mv_n^2}{2} \approx \frac{M}{m} \frac{\hbar^2}{2mr^2} \quad (4)$$

больше на множитель, равный числу пар в кольце $N_q = M/m$. Дискретность (4) увеличивается с увеличением всех трех размеров сверхпроводника так как число пар $N_q = Vn_q$ пропорционально его объему V . Поэтому сверхпроводимость является макро-

скопическим квантовым явлением (см. [13] и главу 12 в книге [14]). В атоме спектр дискретен потому, что разность энергий (3) $\Delta E_{n+1,n} \approx 2 \cdot 10^{-18}$ Дж при радиусе первой боровской орбиты $r \approx 0,05 \text{ нм} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м}$ соответствует температуре $T \approx \Delta E_{n+1,n}/k_B \approx 100\,000 \text{ К}$. В кольце с $r \approx 0,5 \mu\text{м} = 500 \text{ нм}$ дискретность на восемь порядков меньше, то есть соответствует температуре $T \approx 0,001 \text{ К}$. Число пар $N_q = Vn_q$ в реальных сверхпроводящих кольцах обычно превышает 10^5 даже при относительно малом объеме $V \approx 0,2 \mu\text{м}^3$, как у колец исследовавшихся в [7]. Разность энергий между разрешенными состояниями (4) в таких кольцах соответствует температуре, превышающей 100 К. Эта дискретность спектра является одной из причин наблюдения устойчивого тока.

ВЛИЯНИЕ ВЕКТОР ПОТЕНЦИАЛА. ЭФФЕКТ ААРОНОВА – БОМА

Второй причиной является нарушение симметрии между противоположными направлениями движения при наличии магнитного потока внутри кольца. Согласно общепризнанному определению, оператор $\hat{P} = -i\hbar\nabla$ соответствует каноническому импульсу $p = mv + qA$ частицы с массой m и зарядом q как в магнитном поле $B = \text{rot}A \neq 0$, так и без него $A = 0$ [15]. Соответственно, операторы скорости [16] и кинетической энергии частицы зарядом q зависят от вектор потенциала A . Согласно этим каноническим опре-

делениям, момент импульса (2) и волновая функция не изменяются с появлением магнитного потока внутри кольца, в то время как скорость заряженной частицы

$$\oint_1 dlv = \frac{2\pi\hbar}{m} \left(n - \frac{\Phi}{\Phi_0} \right) \quad (5)$$

электрический ток $I = sqnqv$

$$I_p = \frac{sq}{l} \oint_1 dl \Psi^* \frac{-i\hbar\nabla - qA}{m} \Psi = \frac{n\Phi_0 - \Phi}{L_k} \quad (6)$$

и его кинетическая энергия

$$E_k = \int_V \Psi^* \frac{(-i\hbar\nabla - qA)^2}{2m} \Psi = \frac{(n\Phi_0 - \Phi)^2}{2L_k} \quad (7)$$

не могут быть равны нулю при магнитном потоке внутри кольца Φ , не кратном $\Phi \neq n\Phi_0$ кванту потока Φ_0 . $L_k = ml/sq^2n_q$ – кинетическая индуктивность кольца с длиной окружности $l = 2\pi r$, сечением $s = wh$ и плотностью $n_q = |\Psi|^2$ частиц с зарядом q , равным e для электрона и $2e$ для сверхпроводящей пары. Эффекты связанные с влиянием вектор потенциала A на фазу волновой функции или скорость заряженных частиц были впервые предсказаны в работе Ааронова и Бома [17]. Поэтому такого рода эффекты часто называют эффектами Ааронова – Бома [18].

Наблюдения квантовой периодичности

Выражения (6) и (7) лежат в основе описания квантовой периодичности, наблюдаемой при измерениях сверхпроводящих колец с малым сечением $s \ll \lambda_L^2$ [4–12, 18–20]. $\lambda_L = (m/\mu_0q^2n_q)^{1/2} = \lambda_L(0)(1 - T/T_c)^{-1/2}$ – Лондонская глубина проникновения магнитного поля. Кинетическая индуктивность $L_k \approx (\lambda_L^2/s)\mu_0l$ превышает магнитную индуктивность $L_f \approx \mu_0l$ в случае слабого экранирования, при $s \ll \lambda_L^2$. Магнитным потоком $\Delta\Phi_1 = L_f I_p$, создаваемым током I_p , пренебрегают в случае достаточно тонкого сверхпроводника с $s \ll \lambda_L^2$. В этом случае используется приближение $\Phi = \Phi_{ext} + L_f I_p \approx \Phi_{ext} = BS$. B – внешнее магнитное поле, создающее поток Φ_{ext} в кольце площадью $S = \pi r^2$.

Согласно универсально признанному объяснению [21], квантовая периодичность магнитных зависимостей температуры сверхпроводящего перехода T_c [19, 20], сопротивления [8, 9], магнитной восприимчивости [22] и критического тока [7, 12, 23] колец наблюдается вследствие изменения квантового числа n при $\Phi = (n' + 0,5)\Phi_0$. Квантовое число n изменяется потому, что энергия (7) минимальна, и сверхпроводящее состояние с $n = n'$ имеет максимальную вероятность P_n при $\Phi < (n' + 0,5)\Phi_0$, тогда как при

$\Phi > (n' + 0,5)\Phi_0$ более вероятно состояние с $n = n' + 1$ [21]. При $\Phi = (n' + 0,5)\Phi_0$ энергия (7) этих состояний одинакова: $E_k = [n\Phi_0 - (n' + 0,5)\Phi_0]^2 / 2L_k = [n'\Phi_0 - (n' + 0,5)\Phi_0]^2 / 2L_k = [(n' + 1)\Phi_0 - (n' + 0,5)\Phi_0]^2 / 2L_k = \Phi_0^2 / 8L_k$.

Уменьшение критической температуры T_c сверхпроводящих колец объясняется увеличением кинетической энергии (7) $\Delta T_c / T_c \propto -E_k \propto -(n\Phi_0 - \Phi)^2$ [21]. В соответствии с этим, максимумы T_c наблюдаются при $\Phi = n'\Phi_0$, а минимумы при $\Phi = (n' + 0,5)\Phi_0$ [20]. Осцилляции сопротивления $\Delta R(\Phi) \propto (n\Phi_0 - \Phi)^2$ [8, 9], измеренные в области сверхпроводящего перехода, в которой сопротивление изменяется с понижением температуры от $R = R_n$ до $R = 0$ при $T < T_c$, рассматриваются как следствие осцилляций $T_c(\Phi)$ [20]. Магнитная восприимчивость $\Delta\Phi_1 = L_f \langle I_p \rangle$, измеряемая вблизи T_c [22], пропорциональна средней величине устойчивого тока $\langle I_p \rangle = \langle (n\Phi_0 - \Phi) \rangle / L_k$. Поэтому она равна нулю при $\Phi = n'\Phi_0$, так как $\langle n \rangle = n'$ при этом значении, и при $\Phi = (n' + 0,5)\Phi_0$ [21] $\langle I_p \rangle = P_{n'}(n'\Phi_0 - \Phi) / L_k + P_{n'+1}((n'+1)\Phi_0 - \Phi) / L_k$, так как вероятности двух состояний равны $P_{n'} = P_{n'+1}$ при этом значении магнитного потока. Устойчивый ток (6), соответствующий минимальной энергии (7), создает диамагнитное состояние при $n'\Phi_0 < \Phi < (n' + 0,5)\Phi_0$ и парамагнитные состояния при $(n' + 0,5)\Phi_0 < \Phi < (n' + 1)\Phi_0$. Магнитная зависимость критического тока $I_c(\Phi)$ симметрического кольца имеет максимумы при $\Phi = n'\Phi_0$ и минимумы при $\Phi = (n' + 0,5)\Phi_0$ (см. рис. 2 в [23]), так как устойчивый ток увеличивает полный ток в одной из половинок кольца.

Переключение между непрерывным и дискретным спектрами

Квантование (2) имеет место и выражения (5), (6), (7), применимые, когда волновая функции определена, то есть имеется фазовая когерентность, вдоль всей окружности кольца. В этом случае сопротивления сверхпроводящего кольца равно нулю и осцилляции сопротивления [8, 9, 19] наблюдаться не могут. Поэтому для описания осцилляций сопротивления [8, 9, 19] необходимо учесть, что в области сверхпроводящего перехода, где они наблюдаются, термические флуктуации переключают сегменты кольца между сверхпроводящим и нормальным состояниями [24]. В этом случае устойчивый ток наблюдается при ненулевом сопротивлении благодаря тому, что дискретность спектра в сверхпроводящем состоянии остается большой, то есть разность энергий (4) соответствует температуре, превышающей температуру измерения даже в области сверхпроводящего перехода. Спектр дискретен в те моменты когда все сег-

менты кольца находятся в сверхпроводящем состоянии, и он становится непрерывным, когда хотя бы один сегмент перешел в нормальное состояние [25]. Благодаря большой дискретности спектра кольцо каждый раз при возвращении в сверхпроводящее состояние принимает одно и тоже значение квантового числа с большой вероятностью, благодаря чему средний по времени устойчивый ток не равен нулю и наблюдаются его осцилляции в магнитном поле [22]. При переключении сегмента кольца с устойчивым током (6) в нормальное состояние на нем должна наблюдаться разность потенциалов, которая должна уменьшаться экспоненциально во времени, вместе с круговым током $I(t) = I_p \exp(-t/\tau_{RL})$ за время релаксации $\tau_{RL} = L_t/R_n$, которое равно отношению индуктивности кольца L_t к сопротивлению сегмента R_n . Так как при возвращении этого сегмента в сверхпроводящее состояние в кольцо должен появиться устойчивый ток (6) того же направления, вследствие большой вероятности состояний с минимальной энергией (7), то при повторяющихся переключениях одного и того же сегмента на нем должна наблюдаться разность потенциалов [26]. Это является качественным объяснением осцилляций постоянного напряжения, наблюдавшихся на асимметричных кольцах [4–12].

Квантовая сила

Осцилляции постоянного напряжения в магнитном поле $V_{dc}(\Phi)$, пример которых показан на рис. 1 в центре, будут наблюдаться в кольце с круговым устойчивым током $\langle I_p \rangle(\Phi)$, когда сегменты в одной из его половинок переключаются в нормальное состояние чаще или на более продолжительное время, чем в другой. Наблюдение таких осцилляций означает, что постоянная составляющая кругового электрического тока, то есть ток усредненный по времени $\langle I_p \rangle(\Phi)$, течет, не затухая, против действия силы постоянного электрического поля $E = -\nabla V_{dc}(\Phi)$, так как электродвижущая сила Фарадея равна нулю $d\Phi/dt = 0$, в постоянном во времени магнитном поле (рис. 1). Данный парадокс можно описать, приняв во внимание изменение момента импульса мобильных носителей заряда при переключениях между дискретным и непрерывным спектрами [1, 3, 24, 25]. При переходе кольца или его сегмента в нормальное состояние момент импульса каждой пары электронов изменяется от $m_p = \hbar n$ до $m_p = q\Phi/2\pi = \hbar\Phi/\Phi_0$ под действием силы диссипации, когда круговой ток уменьшается от значения I_p , определяемого условием квантования (6), до нуля. При возвращении всего кольца в сверхпроводящее состояние проис-

ходит противоположное изменение от $m_p = \hbar\Phi/\Phi_0$ до $m_p = \hbar n$ вследствие требования квантования (2). Изменение $F_q = \hbar((n) - \Phi/\Phi_0) f_{sw}/r$ импульса p в единице времени вследствие квантования (2) при переключениях из нормального состояния в сверхпроводящее с частотой f_{sw} названо в [24] «квантовой силой». Квантовая сила компенсирует силу диссипации, действующую вдоль всей окружности кольца. Это обеспечивает баланс сил при повторяющихся переключениях между сверхпроводящим и нормальными состояниями. Формально квантовая сила, точнее величина $2\pi r F_q$, заменяет электродвижущую силу Фарадея $-d\Phi/dt$ и объясняет оба парадоксальных эффекта, наблюдаемых в явлении устойчивого тока: электрический ток, незатухающий при ненулевом сопротивлении, и постоянный ток, текущий против действия силы электрического поля [25].

МОЩНОСТЬ И НАПРЯЖЕНИЕ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ НЕРАВНОВЕСНЫМИ ШУМАМИ

Исследования, проведенные после доклада [1], подтвердили возможность использования системы асимметричных сверхпроводящих колец для создания источника мощности постоянного тока. Они подтвердили, что постоянное напряжение наблюдается, когда кольца с устойчивым током переключаются между нормальным и сверхпроводящим состояниями неравновесными шумами [2, 4, 5, 8–11] или переменным током [6, 7, 12].

Зависимость амплитуды осцилляций напряжения от температуры и амплитуды шумов по току

При данной температуре, меньшей температуры сверхпроводящего перехода $T < T_c$, амплитуда осцилляций постоянного напряжения $V_{dc}(\Phi)$ зависит немонотонно от амплитуды переменного тока или амплитуды шумов по току $\langle I_n^2 \rangle^{1/2}$ [6, 7]. Осцилляции $V_{dc}(\Phi)$ появляются когда амплитуда $\langle I_n^2 \rangle^{1/2}$ достигает величины критического тока $I_c = I_{c0}(1 - T/T_c)^{3/2}$ при данной температуре T [6, 7]. Их амплитуда быстро достигает максимума и уменьшается при дальнейшем увеличении $\langle I_n^2 \rangle^{1/2}$ [6, 7]. Зависимость амплитуды осцилляций $V_{dc}(\Phi)$ от температуры (при данном значении амплитуды шума $\langle I_n^2 \rangle^{1/2}$ также немонотонна [8, 10, 11]. Осцилляции $V_{dc}(\Phi)$ появляются, когда критический ток $I_c = I_c(T=0)(1 - T/T_c)^{3/2}$ уменьшается до амплитуды шума $\langle I_n^2 \rangle^{1/2}$, их амплитуда увеличивается с повышением температуры T , достигает максимума, а затем уменьшается [8, 10, 11].

Уменьшение амплитуды осцилляций $V_{dc}(\Phi)$ с повышением температуры происходит вследствие уменьшения амплитуды устойчивого тока $I_{p,A} = I_{p,A}(T=0)(1-T/T_c)$ [7]. Максимальная амплитуда $V_{dc}(\Phi)$ уменьшается и температура, ей соответствующая, приближается к T_c с уменьшением амплитуды шумов $(I_n^2)^{1/2}$, так как $I_{p,A}$ и I_c уменьшаются при $T \rightarrow T_c$. Осцилляции $V_{dc}(\Phi)$ [2, 4, 5, 8–10] индуцированы тепловыми шумами, равновесными при комнатной температуре $T \approx 300$ К, которые «перекачиваются» по проводам в криогенную часть измерительной системы. Амплитуда шумов по току $(I_n^2)^{1/2}$, переключающих кольца между нормальным и сверхпроводящим состояниями, определяется мощностью равновесных шумов при комнатной температуре и эффективным сопротивлением проводов в широком спектре частот R_{ef} .

Мощность и амплитуда по току шумов Найквиста

Мощность равновесных шумов (шумов Найквиста) $W_{Nyq,f} = 4k_B T df$ равномерно распределена по частотам от нуля $f=0$ до квантового предела $f \approx k_B T/h$ [16]. Полная мощность шумов Найквиста $W_{Nyq,t} = 4(k_B T)^2/h$ при комнатной температуре

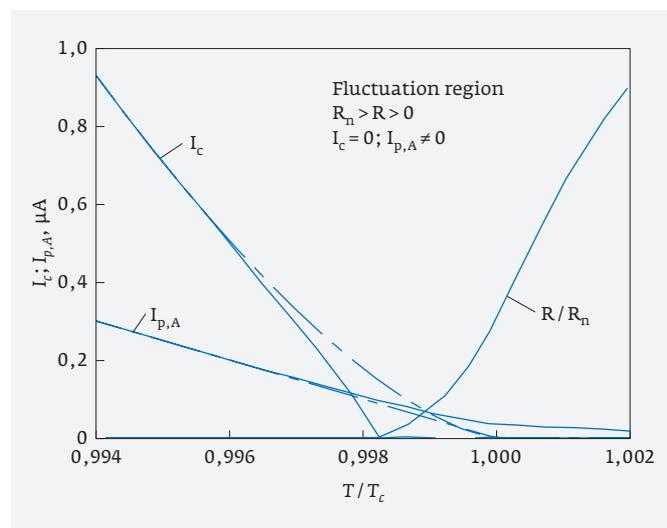


Рис. 2. Критический ток I_c и амплитуда осцилляций устойчивого тока $I_{p,A}$ уменьшаются с приближением температуры T к температуре перехода T_c из сверхпроводящего в нормальное состояние. Термические флуктуации уменьшают величину критического тока и увеличивают устойчивый ток, вследствие чего в области сверхпроводящего перехода устойчивый ток наблюдается при ненулевом сопротивлении колец $R > 0$

$T \approx 300$ К достигает $\approx 10^{-7}$ Вт, $k_B \approx 1,4 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, $h \approx 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж сек – постоянная Планка. В работе [2] осцилляции $V_{dc}(\Phi)$ с амплитудой, превышающей 1 мкВ, были индуцированы на одном кольце шумами с амплитудой $(I_n^2)^{1/2} \approx 3$ мкА. Такая амплитуда шумов должна иметь место при эффективном сопротивлении проводов, соединяющих комнатную и низкотемпературную часто измерительной системы, $R_{ef} \approx W_{Nyq,t} / (I_n^2) \approx 10$ кОм. В работе [8] уровень шумов удалось уменьшить на порядок по току $(I_n^2)^{1/2} \approx 0,25$ мкА за счет увеличения эффективного сопротивления на высоких частотах $R_{ef} \approx 1$ МОм. Еще на порядок, до величины меньшей $(I_n^2)^{1/2} \approx 0,02$ мкА, удалось понизить амплитуду шумов по току в работе [10], благодаря специальным низкотемпературным фильтрам, с эффективным сопротивлением $R_{ef} \approx 100$ МОм. Благодаря этому удалось продемонстрировать возможность использования систем асимметричных сверхпроводящих колец в качестве детектора очень малых шумов, на примере 667 последовательно соединенных асимметричных колец из алюминия диаметром 1 мкм [11].

Оценка величины напряжения, которое может быть получена с помощью системы асимметричных сверхпроводящих колец

Шумы с амплитудой $(I_n^2)^{1/2} \approx 0,02$ мкА удалось детектировать с помощью системы 1080 последовательно соединенных асимметричных колец из алюминия диаметром 2 мкм [10]. Шум амплитудой $(I_n^2)^{1/2} \approx 3$ мкА, индуцировавший на одном кольце осцилляции $V_{dc}(\Phi)$ с амплитудой примерно 1 мкВ = 10^{-6} В [5], на системе 1080 колец индуцировал напряжение $V_{dc}(\Phi) \approx 1$ мВ = 10^{-3} В, то есть амплитуда возросла примерно в 1000 раз. Экспериментально подтвержденное увеличение амплитуды осцилляций $V_{dc}(\Phi)$ с числом колец является главным свидетельством возможности создания источника мощности постоянного тока на основе систем с большим числом асимметричных сверхпроводящих колец. Максимальная мощность $W_{IN} = (NV_{dc})^2 R_l / (R_l + NR_r) \approx NV_{dc}^2 / 4R_r$, которую можно получить на нагрузки с сопротивлением $R_l \approx NR_r$ с помощью системы из N колец с сопротивлением R_r каждый в N раз больше мощности, которую можно получить с одного кольца $W_{l1} \approx V_{dc}^2 / 4R_r$.

При напряжении на одном кольце $V_{dc} \approx 1$ мкВ = 10^{-6} В, которое наблюдалось в [2] при эффективном сопротивлении для тепловых шумов $R_{ef} \approx 10$ кОм, нужно сделать систему из миллиона колец, чтобы полу-

чить напряжение 1 В. Такая система колец диаметром 1 мкм может разместиться на площади размером всего в 1 мм². Напряжение на одном кольце может быть увеличено за счет уменьшения сопротивления тепловых шумов качающихся по проводам с комнатной температурой. Возможность этого подтверждается наблюдением квантовых осцилляций $V_{dc}(\Phi)$ амплитудой 15 мкВ на единичном квантовом интерферометре [27]. Следует отметить, что при температуре, соответствующей максимальному напряжению V_{dc} , при $\langle I_n^2 \rangle^{1/2} \approx 3$ мкА, сопротивление кольца близко к нулю $R_r < 0,001$ Ом [5]. Поэтому увеличение числа колец в системе не должно уменьшать амплитуду по току $\langle I_n^2 \rangle^{1/2}$ тепловых шумов.

Откуда берется наблюдаемая мощность постоянного тока?

Наблюдение осцилляций постоянного напряжения $V_{dc}(\Phi)$ несомненно означает наблюдение мощности постоянного тока V_{dc}^2/R_r при постоянном во времени магнитном потоке $\Phi \neq n\Phi_0$ и $\Phi \neq (n+0,5)\Phi_0$. Наблюдение напряжения $V_{dc}(\Phi)$ при наличии внешнего переменного тока [6, 7, 12] или неравновесных шумов [2, 4, 5, 8–11] не значит, что в данном случае имеет место просто эффект выпрямления. При выпрямлении с помощью диода величина выпрямленного напряжения не увеличивается с увеличением числа диодов, соединенных последовательно. Напряжение на асимметричных сверхпроводящих кольцах суммируется потому, что неравновесный тепловой шум только переключает кольца между сверхпроводящим и нормальным состояниями, когда его амплитуда $\langle I_n^2 \rangle^{1/2} > I_c$. Величина I_c зависит как от температуры, так и от магнитного поля.

Согласно предсказаниям теории, подтвержденным экспериментально [23], критический ток симметричного кольца описывается формулой

$$I_c = I_{c0} - 2|I_p| = I_{c0} - 2I_{p,A} \left| n - \frac{\Phi}{\Phi_0} \right|, \quad (8)$$

в которой $I_{c0} = I_{c0}(T=0)(1-T/T_c)^{3/2}$ – критический ток в отсутствии устойчивого тока $I_p = 0$ при $\Phi = n\Phi_0$; $I_{p,A} = \Phi_0/2L_k = I_{p,A}(T=0)(1-T/T_c)$ – амплитуда осцилляций устойчивого тока $I_p = I_{p,A} 2(n - \Phi/\Phi_0)$. Отношение токов $I_{p,A}/I_{c0} = \sqrt{3}\xi(T)/4r$ определяется отношением корреляционной длины сверхпроводника $\xi(T) = \xi(0)(1-T/T_c)^{-1/2}$ к радиусу кольца r [21]. Корреляционная длина чистого алюминия при нулевой температуре $\xi(0)$ превышает 1 мкм. В пленках с малой длиной свободного пробега электронов она уменьшается примерно до $\xi(0) \approx 0,2$ мкм [7]. Благодаря увеличению корреляционной длины

$\xi(T) = \xi(0)(1-T/T_c)^{-1/2}$ вблизи сверхпроводящего перехода амплитуда устойчивого тока $I_{p,A}$ приближается в этой области к величине критического тока I_{c0} в кольцах из алюминия диаметром $2r \approx 1$ мкм. В этом случае критический ток вблизи половины кванта потока $I_c = I_{c0} - 2I_{p,A}$ (так как $\Phi = (n+0,5)\Phi_0$) может быть в несколько раз меньше чем вблизи целых значений кванта потока $I_c = I_{c0}$ (так как $\Phi = n\Phi_0$) (см. рис. 4 в [11]). Когда устойчивый ток много больше критического тока $I_{p,A} \gg I_c = I_{c0} - 2I_{p,A}$, шумы небольшой амплитуды могут индуцировать постоянное напряжение большой амплитуды, так как ее величина определяется величиной устойчивого тока.

О ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ РАВНОВЕСИИ

В данной работе обращается внимание, прежде всего, на возможность практического использования нового квантового эффекта открытого в ИПТМ РАН семнадцать лет назад [2]. Но открытый эффект поставил также фундаментальную проблему, которая со временем может приобрести практическое значение. Могут ли осцилляции постоянного напряжения $V_{dc}(\Phi)$ наблюдаться в условиях термодинамического равновесия? Усилия по уменьшению неравновесных шумов были предприняты в работах [8, 10] для ответа на этот фундаментальный вопрос. Неравновесные шумы были уменьшены до рекордно малых значений. Но нельзя сказать, что фундаментальный вопрос удалось решить, хотя эти усилия имели практическую пользу, заключающуюся в демонстрации детектора шумов [11]. Вряд ли можно уменьшить неравновесные шумы до нуля и создать реальное термодинамическое равновесие. Но этого и не требуется. Неравновесные шумы необходимы для наблюдения осцилляций $V_{dc}(\Phi)$ в сверхпроводящем состоянии, когда сопротивление равно нулю. В области сверхпроводящего перехода сопротивление $0 < R(T) < R_n$ за счет переключения сегментов кольца между нормальным и сверхпроводящим состояниями термическими флуктуациями [21], то есть равновесными шумами.

Наблюдения устойчивого тока в области сверхпроводящего перехода

О возможности наблюдения осцилляций постоянного напряжения в этой области свидетельствуют многочисленные наблюдения устойчивого тока незатухающего при ненулевом сопротивлении $0 < R(T) < R_n$, например наблюдения осцилля-

ций сопротивления Литтла – Паркса [19]. Осцилляции Литтла – Паркса наблюдаются благодаря тому, что термические флуктуации уменьшают величину критического тока и увеличивают устойчивый ток в области сверхпроводящего перехода (рис. 2). Без учета флуктуаций $I_{c0}(T)$ и $I_{p,A}(T)$ ток уменьшается до нуля при одной температуре $T = T_c$. Флуктуации уменьшают I_{c0} до 0 при $T < T_c$ и делают $I_{p,A}$ ненулевым при $T > T_c$ (рис. 2). Осцилляции устойчивого тока предсказываются [28] и наблюдаются [20] даже выше области сверхпроводящего перехода. Но их амплитуда в этой области очень мала. Последовательно соединенных 1080 колец оказалось недостаточно для наблюдения осцилляции $V_{dc}(\Phi)$ при температурах, соответствующих верхней части резистивного перехода, где $R(T) \approx R_n$ [10]. Осцилляции $V_{dc}(\Phi)$ с амплитудой $\geq 0,02$ мкВ, доступной для измерения, удалось наблюдать только в нижней части перехода при $R(T) \leq 0,3R_n$ (см. рис. 4 в [10]). Это в определенной степени свидетельствует о наблюдении постоянного напряжения $V_{dc}(\Phi)$ при термодинамическом равновесии. Но для окончательного решения фундаментального вопроса необходимо использовать системы с числом асимметричных сверхпроводящих колец большим, чем 1080 [10], чтобы наблюдать осцилляции $V_{dc}(\Phi)$ с амплитудой $\geq 0,02$ мкВ в верхней части резистивного перехода.

Наблюдение устойчивого тока в кольцах из нормального металла

Устойчивый ток наблюдается не только выше сверхпроводящего перехода, но и в кольцах из нормальных металлов. Теоретически это квантовое явление было предсказано еще в 1970 году [29], но надежно наблюдалось относительно недавно [30, 31]. Устойчивый ток электронов в кольцах из металлов и полупроводников наблюдается по тем же причинам, что и устойчивый ток сверхпроводящих пар (6): квантование Бора и эффект Ааронова – Бома. Но электроны, являясь, в отличие от сверхпроводящих пар, фермионами, а не бозонами, не могут находиться на одном уровне с квантовым числом n . Вследствие этого, дискретность спектра колец из нормального металла много меньше, чем колец из сверхпроводников, устойчивый ток электронов может наблюдаться только в кольцах малого радиуса и его величина экспоненциально уменьшается с повышением температуры (см. рис. 3 в [30]). Так как электроны занимают уровне от $n = -n_F$ до $n = +n_F$ с противоположным направлением скорости (5), устойчивый ток в одномерном канале $I_{p,1} = ev_F/2\pi r$ создается одним электроном на уровне Ферми n_F [32].

При типичных значениях скорости Ферми v_F свободный электрон, который не рассеивается, должен создавать ток $I_{p,1}$ порядка 100 нА в одномерном канале радиусом $r \approx 300$ нм. В кольце имеется множество одномерных каналов, число которых определяется сечением. Но суммарный устойчивый ток пропорционален не числу каналов N_{ch} , а $\sqrt{N_{ch}}$, так как скорость электронов, создающих ток в одномерном канале, в отличие от скорости пар, может быть направлен как по часовой, так и против часовой стрелки при одном значении магнитного потока Φ . Амплитуда осцилляций устойчивого тока $I_{p,A} < 1$ нА электронов, наблюдавшихся в кольцах с $r \approx 300$ нм [30], на несколько порядков меньше $\sqrt{N_{ch}} \cdot 100$ нА, что объясняется рассеянием электронов. Устойчивый ток наблюдался в [30] в диффузионном режиме, когда длина свободного пробега электронов меньше длины окружности. В соответствии с теорией, амплитуда $I_{p,A}$ устойчивого тока электронов экспоненциально уменьшается с повышением температура и область температур, где это происходит, обратно пропорциональна радиусу кольца $1/r^2$ (см. рис. 3 в [30]). Согласно экспериментальным данным приведенным на рис. 3 в [30] устойчивый ток электронов будет наблюдаться при комнатной температуре в кольцах радиусом $r \approx 30$ нм. Так как нанотехнология сейчас осваивает столь малые размеры, интерес к явлению устойчивого тока в кольцах из нормальных металлов и сверхпроводников должен возрасть.

Здесь, прежде всего, возникает вопрос о возможности наблюдения разности потенциалов (1) в кольцах с разным сопротивлением половинок. Казалось бы, что после успешного наблюдения устойчивого тока электронов [30, 31], тем более в диффузионном режиме, должны быть предприняты попытки наблюдения осцилляций напряжения, которые наблюдались на сверхпроводящих кольцах [2, 4, 5, 8–10]. Амплитуда осцилляций в этом случае должна увеличиваться пропорционально \sqrt{N} , а не числу одинаковых колец N , как в сверхпроводящей системе. Тем не менее попытка наблюдения таких осцилляций является доступной в технологическом и экспериментальном плане. Многих ученых от такой попытки останавливает многовековая убежденность в невозможности вечного двигателя. В случае наблюдения постоянного напряжения на асимметричных кольцах из сверхпроводника [2, 4, 5, 8–10] можно сказать, что наблюдаемая мощность постоянного тока индуцирована неравновесными шумами. Но в случае наблюдения квантовых осцилляций постоянного напряжения на асим-

метричных кольцах из нормального металла этого сказать нельзя. Поэтому большинство ученых заранее уверены, что такие осцилляции наблюдаться не могут.

Более того, авторы [30] уверены, что наблюдаемый ими устойчивый ток является бездиссипативным (dissipationless). Автор [33], согласный с ними, не только никак не объясняет возможности dissipationless тока в нормальном металле, но и признает: *«Идея о том, что обычное, не сверхпроводящее металлическое кольцо может пропускать постоянный ток, который течет вечно без рассеивания энергии, кажется нелепой. Металлические провода обладают электрическим сопротивлением, а токи, проходящие через резисторы, рассеивают энергию»*. Идея авторов о dissipationless current при наличии сопротивления является не только нелепой, но и бесполезной, так как она не может объяснить каким образом устойчивый ток может течь не затухая против действия силы постоянного электрического поля (см. рис. 1). Поэтому верным [9] может быть только утверждение автора, предсказавшего устойчивый ток электронов: *«Токовое состояние отвечает в данном случае минимуму свободной энергии, поэтому учет диссипации не приводит к его распаду»* [29]. Это означает, что в явлении устойчивого тока I_p , наблюдаемого при $R > 0$ выше сверхпроводящего перехода и в кольцах из нормального металла, происходит диссипация энергии мощностью RI_p^2 .

О причине сомнений Планка в Н-теореме Больцмана

Авторы [30, 33] не хотят этого признавать, так как наличие диссипации RI_p^2 предполагает наличие источника мощности RI_p^2 , который является по определению вечным двигателем, так как незатухающий устойчивый ток I_p наблюдается при термодинамическом равновесии. Вера в невозможность вечного двигателя сыграла важную роль в истории науки. В своей гениальной работе 1824 года [34] Сади Карно постулировал максимальный КПД

$$\text{кпд} \leq 1 - T_x / T_n \quad (9)$$

любой тепловой машины на том основании, что в противном случае *«это было бы не только вечным движением, но и беспредельным созданием движущей силы без затраты теплорода или каких-либо других агентов»*. Как писал в 1914 году Смолуховский: *«Принцип Карно мы называем со времен Клаузиуса вторым началом термодинамики»* [35]. Гениальность Карно состоит в том, что

пользуясь представлением о теплороде он определил связь между максимальным КПД тепловой машины и невозможностью вечного двигателя, которая сохраняется во всех представлениях. Когда тепло стали считать видом энергии, стало понятно, что Карно постулировал необратимость в физике. Если бы все процессы были обратимы, то вечный двигатель был бы неизбежен в силу закона сохранения энергии, согласно которому, энергия не только не появляется, но и не исчезает. Машина останавливается, когда у нее выключается мотор потому, что ее кинетическая энергия направленного движения превращается в хаотическую энергию теплового движения. Если бы возможен был обратный процесс, то горячее было бы ненужно. Горячее используется для создания разности температур, так как, согласно принципу Карно (9), КПД любой тепловой машины равен нулю без разности температур.

Из-за очевидного противоречия между обратимостью законов механики и постулированной необратимостью термодинамики большинство ученых в конце 19-го и даже в начале 20-го века отрицательно относились к статистической теории Максвелла – Больцмана. Смолуховский писал в 1914 году: *«В силу доверия к большим достижениям термодинамики этот принцип [принцип Карно] был возведен в ранг абсолютной, точной и не знающей исключения догмы. А так как в то время молекулярная кинетика при интерпретации этого начала столкнулась с известными трудностями, связанными с необратимостью процессов, она вместе с атомистикой была сразу же осуждена как несостоятельная»* [35]. Среди тех, кто отрицательно относился к теории молекулярной кинетики Больцмана, были такие выдающиеся и даже великие ученые как Анри Пуанкаре и Макс Планк. Но в 20 веке теория Больцмана, которая в 19 веке считалась противоречащей термодинамике, стала считаться обоснованием второго закона термодинамики [36]. Ученые верят, что Н-теорема Больцмана преодолела противоречие между обратимостью механики и необратимостью термодинамики.

Авторы [36] поставили под сомнение Н-теорему Больцмана. Задолго до них это сделал великий ученый Макс Планк, который отмечал, что *«в вычислениях Больцмана отсутствует упоминание о допущении молекулярного беспорядка, необходимого для справедливости его теоремы»* [37]. Планк писал: *«По-видимому он [т.е. Больцман] считал это чем-то само собой разумеющимся»* [37]. Все физики вслед за Больцманом считали допущение молекулярного беспорядка чем-то само

собой разумеющимся. Но устойчивый ток есть экспериментальное свидетельство нарушения *допущения молекулярного беспорядка*. Поэтому необходимо признать, что педантичность Планка оказалась гениальной. На важность постулата о невозможности направленного теплового движения для сохранения веры в невозможность вечного двигателя обращал внимание также Смолуховский [35]. Но в отличие от Планка, он пытался доказать обоснованность *допущения молекулярного беспорядка* и, как следствие, невозможность полезного вечного двигателя.

Констатируя, что с победой атомистическо-кинетического миропонимания второе начало термодинамики потеряло свое значения как непоколебимая догма, Смолуховский утверждал: «Напротив, с точки зрения молекулярной статистики совершенно правильно положение термодинамики о том, что не может быть получено регрессивит *movily* второго рода, если этому выражению придают более точный смысл, а именно: „автоматическая машина, потребляющая теплоту другого тела с более низкой температурой, за счет непрерывного производства конечной работы“» [35]. Смолуховский обосновывал невозможность такой автоматической машины доказательством невозможности направленного теплового движения. Буквально такое же доказательство привел почти через 50 лет Ричард Фейнман в Главе 46 «Храповик и собачка» своих лекций по физике [16]. Смолуховский и Фейнман убедительно доказывали, что с помощью механических устройств невозможно создать направленное движение при термодинамическом равновесии, так как части любого механического устройства, например храповик и собачка, подвержены тепловому движению. Но дискретность спектра и нарушение симметрии между противоположными направлениями при наличии магнитного потока не подвержены тепловому движению. Именно поэтому, вопреки доказательству Смолуховского [35] и Фейнмана [16], наблюдается такое направленное тепловое движение, как устойчивый ток [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы обращаем внимание в данной статье на то, что новый квантовый эффект, открытый в ИПТМ РАН, имеет перспективы применения в качестве основы создания не только детектора шумов, что было продемонстрировано в [9], но и источников мощности постоянного тока. Это применение является в определенном смысле более простым, так как не требует подавления тепловых

шумов. Такой источник мощности может найти более широкое применение, если системы асимметричных колец будут сделаны из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) с температурой сверхпроводящего перехода, превышающей температуру кипения жидкого азота $T_N \approx 77$ К. Мы также обращаем внимание на явление устойчивого тока электронов, значение которого будет возрастать с уменьшением размеров наноструктур. Исследования данного явления имеют как фундаментальное так и практическое значение. Фундаментальное значение связано с вопросом о возможности наблюдения постоянной разности потенциалов на половинках колец с разным сопротивлением, через которые течет незатухающий устойчивый ток. Практическое значение связано с возможностью создания источников мощности постоянного тока, работающих при комнатной температуре.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Aristov V. V. and Nikulov A. V.** Quantum Power Source. Putting in Order of a Brownian Motion without Maxwell's Demon // the Proceedings of SPIE, 2003, vol. 5128 «Quantum informatics», pp. 148-156; arXiv: cond-mat/0310073
2. **Дубонос С. В., Кузнецов В. И., Никулов А. В., Тулин В. А.** Наблюдение постоянного напряжения, осциллирующего в функции магнитного поля, на сегментах неоднородного сверхпроводящего кольца // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференция «Микро- и нано-электроника 2001». 2001. Т. 2, Р. 2-25.
3. **Nikulov A. V.** Could ordinary quantum mechanics be just fine for all practical purposes? // Quantum Studies: Mathematics and Foundations. 2016. V. 3. P. 41-55.
4. **Dubonos S. V., Kuznetsov V. I., and Nikulov A. V.** Segment of an Inhomogeneous Mesoscopic Loop as a DC Power Source // Proceedings of 10th International Symposium «NANOSTRUCTURES: Physics and Technology», St Petersburg: Ioffe Institute, p. 350 (2002).
5. **Dubonos S. V., Kuznetsov V. I., and Nikulov A. V.** Quantum voltage oscillations observed on segments of an inhomogeneous superconducting loop // ArXiv: cond-mat/0305337

6. **Дубонос С. В., Кузнецов В. И., Жилев И. Н., Никулов А. В., Фирсов А. А.** Наблюдение постоянного напряжения, пропорционального устойчивому току в сверхпроводящих кольцах, индуцированного внешним переменным током // Письма в ЖЭТФ 2003. Т. 77. С. 439.
7. **Гуртовой В. Л., Дубонос С. В., Никулов А. В., Осипов Н. Н., Тулин В. А.** Зависимость величины и направления устойчивого тока от величины магнитного потока в сверхпроводящих кольцах // ЖЭТФ 2007. Т. 132. С. 1320-1339.
8. **Бурлаков А. А., Гуртовой В. Л., Дубонос С. В., Никулов А. В., Тулин В. А.** Исследование эффекта Литтла-Паркса на системе асимметричных сверхпроводящих колец // Письма в ЖЭТФ 2007. Т. 86. С. 589-593.
9. **Gurtovoi V. L., Ilin A. I., Nikulov A. V., and Tulin V. A.** Weak dissipation does not result in the disappearance of the persistent current // Low Temp. Phys. 2010. V. 36. P. 974-981.
10. **Burlakov A. A., Gurtovoi V. L., Ilin A. I., Nikulov A. V., and Tulin V. A.** A possibility of persistent voltage observation in a system of asymmetric superconducting rings // Phys. Lett. A 2012. V. 376. P. 2325-2329.
11. **Gurtovoi V. L., Exarchos M., Antonov V. N., Nikulov A. V. and Tulin V. A.** Multiple superconducting ring ratchets for ultrasensitive detection of non-equilibrium noises // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 109. P. 032602.
12. **Burlakov A. A., Chernykh A. V., Gurtovoi V. L., Ilin A. I., Mikhailov G. M., Nikulov A. V., Tulin V. A.** Quantum periodicity in the critical current of superconducting rings with asymmetric link-up of current leads // Phys. Lett. A 2017. V. 381. P. 2432-2438.
13. **Nikulov A. V.** Bohm's quantum potential and quantum force in superconductor // AIP Conference Proceedings, Vol. 1101 «Foundations of Probability and Physics-5» 2009. P. 134; arXiv: 0812.4118 (2008).
14. **Гринштейн Дж., Зайонц А.** Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики / Пер. с англ. под ред. и с доп. В. В. Аристова и А. В. Никулова. – Долгопрудный: ИД «ИНТЕЛЛЕКТ», 2-е изд. 2012.
15. **Ландау Л. Д., Лифшица Е. М.** Квантовая механика. Нерелятивистская теория. – М.: Наука, 1989.
16. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. – М.: Мир, 1967; Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M. The Feynman Lectures on Physics, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1963.
17. **Aharonov Y., Bohm D.** Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory // Phys. Rev. 1959. V. 115. P. 485.
18. **Gurtovoi V. L., Nikulov A. V., Tulin V. A.** Aharonov-Bohm effects in nanostructures // Proceedings of 17th International Symposium «NANOSTRUCTURES: Physics and Technology», Belarus, Minsk, Institute of Physics NAS. 2009. P. 87; arXiv: 0910.5172 (2009).
19. **Little W. A., Parks R. D.** Observation of Quantum Periodicity in the Transition Temperature of a Superconducting Cylinder // Phys. Rev. Lett. 1962. V. 9. P. 9.
20. **Vloeberghs H., Moshchalkov V. V., Van Haesendonck C., Jonckheere R., and Bruynseraede Y.** Anomalous Little-Parks oscillations in mesoscopic loops // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 69. P. 1268-1271.
21. **Тинкхам М.** Введение в сверхпроводимость. Атомиздат М. 1980. Tinkham, M.: Introduction to Superconductivity. Second Edition. McGraw-Hill Book Company, New-York, 1996.
22. **Koshnick N. C., Bluhm H., Huber M. E., Moler K. A.** Fluctuation Superconductivity in Mesoscopic Aluminum Rings // Science 2007. V. 318. P. 1440.
23. **Гуртовой В. Л., Дубонос С. В., Карпий С. В., Никулов А. В., Тулин В. А.** Противоречие между наблюдениями квантовых осцилляций сопротивления и критического тока асимметричных сверхпроводящих колец // ЖЭТФ 2007. Т. 132. С. 297-303.
24. **Nikulov A. V.** Quantum Force in a Superconductor // Phys. Rev. B2001. V. 64. P. 012505.
25. **Nikulov A. V.** The Meissner effect puzzle and the quantum force in superconductor // Phys. Lett. A 2012. V. 376. P. 3392-3397.
26. **Nikulov A. V. and Zhilyaev I. N.** The Little-Parks Effect in an Inhomogeneous Superconducting Ring // J. Low Temp. Phys. 1998. V. 112. P. 227-236.
27. **De Waele A. Th. A. M., Kraan W. H., De Bruynouboter R., and Taconis K. W.** On the DC Voltage across a Double Point Contact between Two Superconductors at Zero Applied DC Current in Situations in which the Junction is in the Resistive Region due to the Circulating Current of Flux Quantization // Physica 1967. V. 37. P. 114-124.

28. **Кулик И. О.** Квантование магнитного потока в нормальном состоянии // ЖЭТФ 1970. Т. 58. С. 2171–2175.
29. **Кулик И. О.** Квантование потока в нормальном металле // Письма в ЖЭТФ 1970. Т. 11. С. 407–410.
30. **Bleszynski-Jayich A. C., Shanks W. E., Peaudecerf B., Ginossar E., von Oppen F., Glazman L., Harris J. G. E.** Persistent Currents in Normal Metal Rings // Science 2009. V. 326. P. 272–275.
31. **Bluhm H., Koshnick N. C., Bert J. A., Huber M. E., and Moler K. A.** Persistent Currents in Normal Metal Rings // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. P. 136802.
32. **Cheung H.-F., Gefen Y., Riedel E. K., and Shih W.-H.** Persistent currents in small one-dimensional metal rings // Phys. Rev. B 1988. V. 37. P. 6050–6062.
33. **Birge N. O.** Sensing a Small But Persistent Current // Science 2009. V. 326. P. 244–245.
34. **Карно С.** Размышления о движущей силе огня и о машинах способных развивать эту силу. Сборник работ «Второе начало термодинамики» ГТТИ, Москва-Ленинград, 1934.
35. **Смолуховский М.** Границы справедливости второго начала термодинамики // УФН. 1967. Т. 93. С. 724–748.
36. **Lesovik G. B., Lebedev A. V., Sadovskyy I. A., Suslov M. V., and Vinokur V. M.** H-theorem in quantum physics // Scientific Reports 2016. V. 6. P. 32815.
37. **Планк М.** Научная автобиография // УФН. 1958. Т. 64. С. 625–637.

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ СПИН-ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ТОКОМ ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР НА БАЗЕ ПЕРМАЛЛОЯ

► Л. С. Успенская
ИФТТ РАН

В работе обсуждается возможность практического использования эффектов смещения доменных границ током в полосковых структурах пермаллой, пермаллой / медь, пермаллой / тантал, пермаллой / ниобий. Сообщается об обнаружении интересного для приложений эффекта – раскрытии доменной границы в домен с поперечной намагниченностью, происходящего со скоростью $\sim 4\,000$ м/с, который может быть использован для последовательного обратимого переключения ряда элементов локальным магнитным полем.

SPIN-POLARIZED CURRENT SWITCHING OF PERMALLOY BASED HYBRID STRUCTURES

L. S. Uspenskaya
ISSP RAS

The applicability of the spin-polarized current for magnetic domain motion in single-layer permalloy stripes and bilayer permalloy / copper, permalloy / tantalum, permalloy / niobium stripes is discussed. The interesting for application effect of the transformation of the domain wall into the domain with perpendicular to the stripe in-plane magnetization is reported. The effect can be used for series switching of any magnetic field-sensitive elements with the rate of $\sim 4\,000$ m/s.

Идея Стюарта Паркинга, озвученная десяток лет тому назад, о возможности создания трехмерной магнитной беговой памяти [1] была с энтузиазмом поддержана мировым научным сообществом, поскольку сулила значительный энергетический выигрыш, упрощение архитектуры устройств и увеличение их быстродействия. Предлагалось заменить движущийся при записи и считывании магнитный носитель с записанными на нем битами информации (магнитными доменами), на неподвижную ленту (магнитную нанопроволоку), по которой нанодомены перемещаются импульсами протекающего по ней электрического тока. Если такую наноленту изготовить в виде трехмерной гофрированной шины, то плотность записи информации в пересчете на площадь носителя на порядки увеличится. Со временем было предложено много новых потенциально возможных применений эффекта переноса

тока спина или спинового момента: интегрированные в полупроводниковые устройства магнитные переключатели, перестраиваемые током высокочастотные излучатели, магниторезистивная оперативная память, магниторезистивные сенсоры и др. [2, 3, 4]. Практические идеи стимулировали широчайшие экспериментальные и теоретические исследования физики явлений [5, 6, 7, 7a]. Экспериментально было подтверждено, что перемагничивание структур спин-поляризованным током осуществлять возможно и в перпендикулярной (ток протекает поперек слоев структур) и в продольной геометрии (ток протекает вдоль слоев) [8]. Экспериментально было показано, что существует пороговый ток j_{c1} , выше которого происходит смещение магнитных доменных границ током (аналог коэрцитивности при перемагничивании магнитным полем), и существует предельный ток j_{c2} , при котором достигается наибольшая скорость смещения

границ (аналог поля Уокера при перемагничивании магнитным полем) [9]. Величина j_{c1} зависит от материала, от геометрических размеров и других факторов, но по порядку величины имеет значения 10^{11} – 10^{12} А/м² [9]. При $j_{c1} < j < j_{c2}$ скорость смещения границ под действием спин-поляризованного тока пропорциональна плотности тока и обычно не превышает десятка метров в секунду. Одновременное приложение небольшого магнитного поля, порядка поля коэрцитивности, уменьшает пороговый ток и увеличивает скорость смещения стенок примерно до 100 м/с [1, 8]. Было также выяснено, что токи плотностью $\sim 10^{11}$ – 10^{12} А/м², даже прикладываемые в виде импульсов длительностью всего несколько наносекунд, обуславливают значительный перегрев структур, который согласно различным исследованиям, достигает 20, 50, 100 и даже 300 градусов [10, 11, 12]. Манипуляция намагниченностью с помощью спин-поляризованного тока возможна и в чисто ферромагнитных структурах, в различных гетероструктурах с магнитными слоями, например, ферромагнетик-полупроводник [13]. Несмотря на возникающие трудности, исследования, направленные на создание новых типов энергонезависимых магнитных носителей, магниторезистивной оперативной памяти и др. элементов, использующих эффекты магнитного переключения протекающим током продолжают.

В то же время идут интенсивные работы по созданию крио-компьютеров, в которых все элементы будут реализованы на основе сверхпроводящих пленок и гетероструктур на основе сверхпроводящих пленок [14а]. В частности, в качестве элемента памяти в таком компьютере предполагается использовать КУБИТ – ячейку памяти на основе джозефсоновского перехода. Логические элементы, линии передачи информации, диоды, транзисторы, фазовращатели, переключатели сопротивления и др. элементы компьютеров также должны быть изготовлены на основе сверхпроводящих слоев. И часть из этих элементов предполагается изготавливать на основе структур сверхпроводник-магнетик [14–20]. В настоящее время такие структуры переключаются слабыми магнитными полями, но представляется, что было бы полезно реализовать их переключение током. Недавно была показана принципиальная возможность реализации такого типа устройств [21–24].

Эксперименты выполнялись на бислойных структурах пермаллой-ниобий, изготовленных по стандартной технологии методом магнетронного осаждения на оксидированный кремний [21]. Оба слоя

изготавливались в одном вакуумном цикле. Толщина слоя пермаллоя была ~ 40 нм, толщина подслоя ниобия ~ 100 нм. Осаждение пермаллоя производилось в присутствии плоскостного магнитного поля величиной $\sim 0,1$ Т, что обеспечивало одноосную анизотропию в плоскости пленки величиной $\sim 0,0002$ Т, спонтанную намагниченность ~ 1 Т, ориентированную в плоскости пленки и однодоменность пленки пермаллоя в размагниченном состоянии [25]. После напыления методом взрывной литографии на пленках формировалась полосовая структура с шириной полосок 2 и 7 мкм и длиной ~ 1 мм; полоски ориентировались вдоль направления анизотропии. Наблюдение магнитной доменной структуры и ее изменения под действием импульсов продольного электрического тока выполнялось методом магнитооптической визуализации с помощью индикаторных пленок – пленок иттрий-железистого граната, характеризующихся углом вращения плоскости поляризации света ~ 200 град/Т [25], помещаемых непосредственно на поверхность исследуемых структур. В силу непрерывности перпендикулярной компоненты индукции, ее направление на поверхности образца и в индикаторной пленке совпадает, поэтому картина, полученная при наблюдении в поляризационно-оптическом микроскопе в отраженном свете при небольшом ~ 5 – 10° угле между поляризатором и анализатором соответствует распределению индукции в исследуемом образце. При этом поля рассеяния на краях образца и доменные границы блоховского типа дают просветление или затемнение изображения в зависимости от абсолютной ориентации перпендикулярной компоненты индукции (рис. 1), а границы неелевского типа дают двойное черно-белое изображение [25]. Метод позволяет в режиме реального времени наблюдать магнитную доменную структуру и ее трансформацию. Временное разрешение определяется используемой камерой (~ 1 мкс). При необходимости, можно делать захват изображения в режиме импульсной подсветки, синхронизированной с импульсами магнитного поля или тока. Таким образом, метод позволяет наблюдать статическую магнитную доменную структуру и определять скорость ее изменения, в том числе определять скорость смещения доменных границ.

Микрополоски пермаллоя и в размагниченном состоянии, и после плавного перемагничивания находились в однодоменном состоянии с намагниченностью, ориентированной вдоль полосок. Формирование в них доменных границ осуществлялось короткими импульсами магнитного поля. Границы

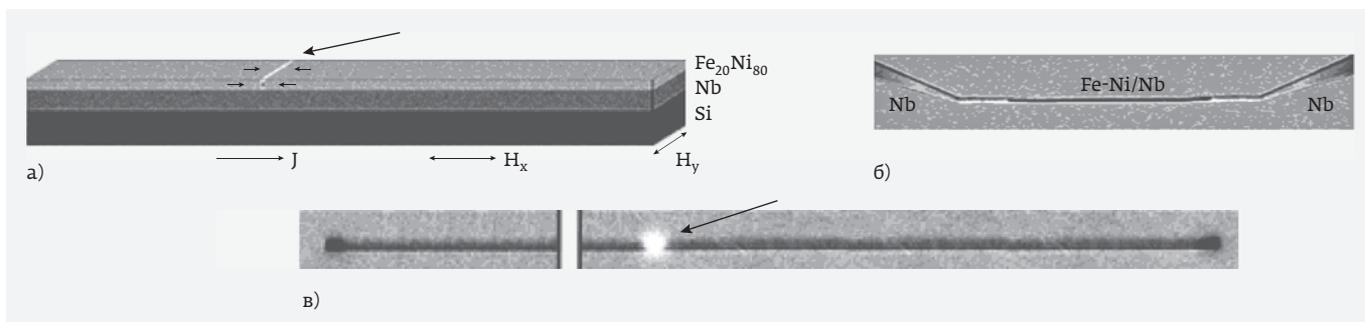


Рис. 1. Схематичное изображение бислоистой структуры пермаллой-ниобий (а), реальное изображение структуры с контактами – полоска пермаллоя длиной 1 мм напылена по центру структуры (б) и магнитооптическое изображение полоски пермаллоя (в) – доменная граница, отмеченная стрелкой на схеме и на изображении, видна, как белое пятно, поля рассеяния на концах полоски – темные пятна

имели структуру типа хвост-к-хвосту или голова-к-голове (tail-to-tail или head-to-head) [21].

Под действием импульсного магнитного поля, приложенного вдоль намагниченности, движение доменных границ начинается только при превышении порогового поля H_c - коэрцитивности для движения границ, с некоторой задержкой τ по времени, величина которой определяется температурой и величиной поля (рис. 2а). Скорость границ V тоже зависит от поля и температуры (рис. 2б, 3а). Увеличение поля приводит к уменьшению задержки начала движения границ и увеличению их скорости. Понижение температуры - к увеличению задержки и уменьшению скорости. Коэрцитивность H_c экспоненциально возрастает с температурой (рис. 2в). Следует отметить, что максимальная скорость смещения границ, индуцированного магнитным полем, во всем исследованном температурном диапазоне 6–300 К не превышает 20 м/с.

Приложение импульсов тока выше порогового значения также вызывает смещение доменных границ. Направление смещения совпадает с направлением тока. Скорость смещения возрастает при увеличении силы тока, при уменьшении фронта нарастания тока (в экспериментах удавалось достичь время ~10 нс), а также при уменьшении температуры. При этом максимальная скорость смещения границ достигает неожиданно большого значения - 4000 м/с [21], что в десять раз превышает Уокеровский предел скорости границ в пермаллоеве и в десятки раз превышает скорость движения той же доменной границы под действием магнитного поля, что видно из сравнения рис. 3а и рис. 3б. Надо подчеркнуть, что максимальная скорость смещения границ под действием тока наблюдается при низкой температуре, в то время как под действием магнитного поля - при высокой температуре.

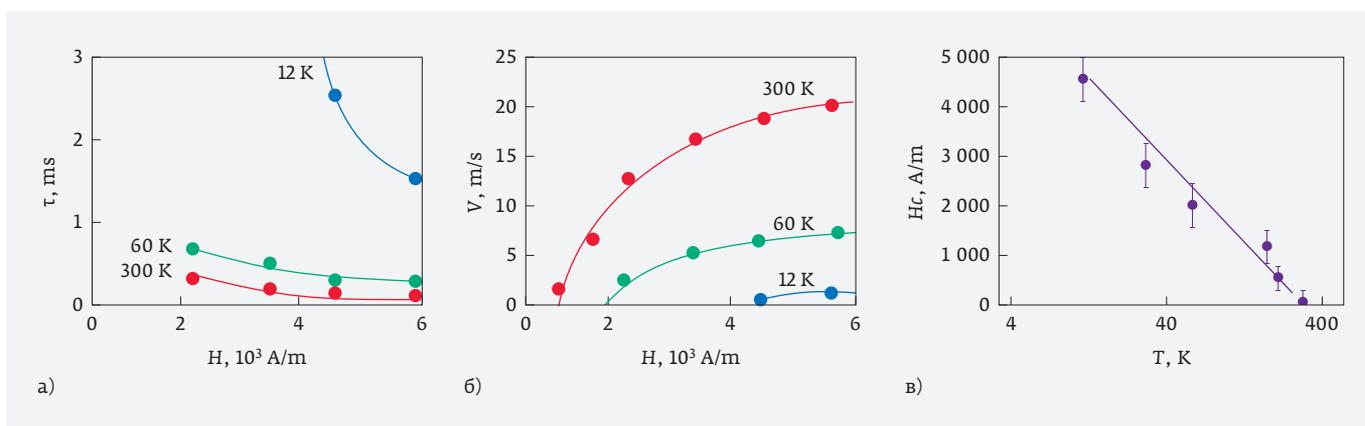


Рис. 2. Задержка начала движения и максимальная скорость движения доменных границ под действием импульсного магнитного поля в полоске пермаллой / ниобий при температурах 300, 60 и 12 К и изменение коэрцитивности с температурой

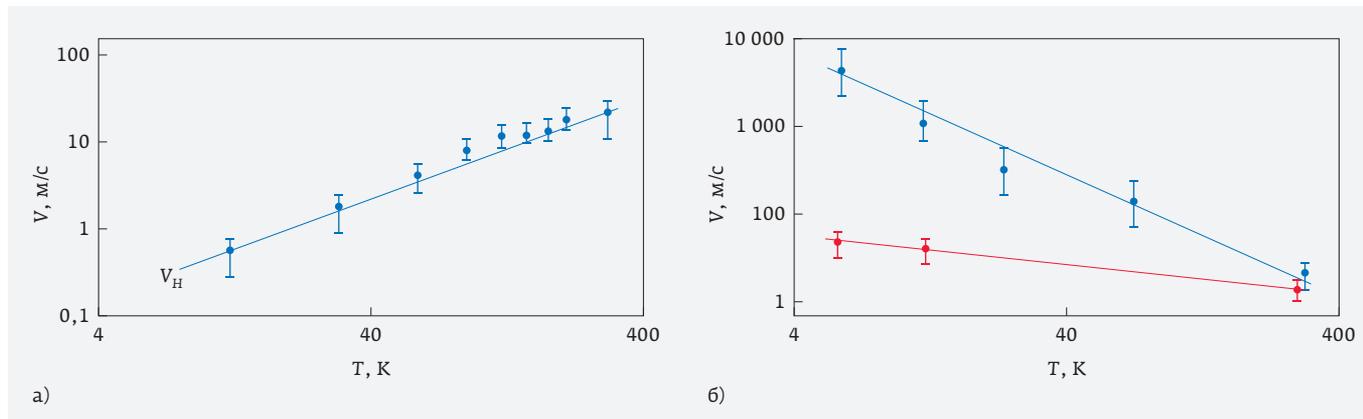


Рис. 3. а – температурная зависимость максимальной скорости смещения доменных границ в бислоевой структуре пермаллой / ниобий под действием магнитного поля, б – то же под действием тока в структуре пермаллой / ниобий (синий) и в монослое пермаллоя (красный)

Еще одно существенное различие при смещении границ полем или током заключается в следующем: после смещения полем вид доменной границы не изменяется, в то время как после смещения током явно виден необратимый наклон векторов намагниченности в границе и ее трансформация [22–24]. При токах, незначительно превышающих пороговый, это трансформация из head-to-head в неелевскую границу, то есть в границу, где разворот намагниченности осуществляется в плоскости пленки (рис. 4а, 4б). По мере усиления тока происходит преобразование границы в протяженный домен с плоскостной, перпендикулярной к длине полоске, намагниченностью [24], длина домена прямо пропорциональна силе тока и обратно пропорци-

ональна длительности импульса тока (рис. 4а, 4в). Приложение тока обратной полярности приводит к уменьшению длины домена.

Домен с перпендикулярной к полоске намагниченностью принципиально отличается от домена с продольной намагниченностью: при формировании такого домена на продольных краях полоски появляются поля рассеяния, индукция которых определяется величиной спонтанной намагниченности пермаллоя (на рис. 4в эти поля дают черный и белый контраст вдоль полоски пермаллоя). И хотя природа этого эффекта «раскрытия» домена или, что то же самое, различия скорости движения переднего и заднего фронтов границы (рис. 4г) не вполне еще выяснена [24], эффект уже может быть

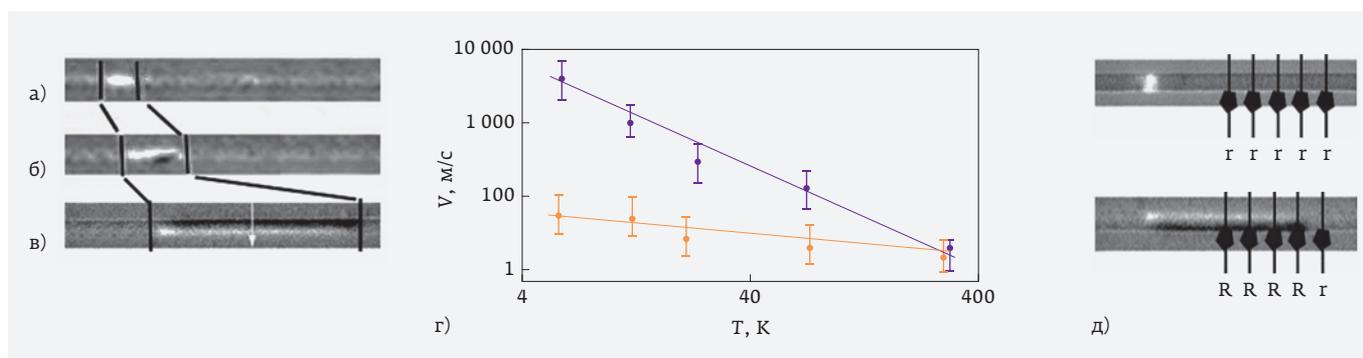


Рис. 4. а – доменная граница до приложения тока; б – граница после пропуска импульса тока плотностью $2 \cdot 10^{11}$ А/м² длительностью 100 нс при 7 К; в – вид магнитной доменной структуры после приложения более сильного тока $\sim 3 \cdot 10^{11}$ А/м²; г – температурные зависимости максимальной скорости смещения переднего фронта границы (фиолетовый) и заднего фронта границы (оранжевый) в структуре пермаллой / ниобий под действием тока; д – схема, поясняющая возможное использование эффекта трансформации границы, – последовательное переключение сопротивления набора сверхпроводящих линий

использован для последовательного переключения ряда элементов, свойства которых, как например, сопротивление сверхпроводника, зависят от наличия/отсутствия магнитного поля (схема на рис. 4д). При скорости раскрытия домена ~0,5 мм за 10 нс и расстоянии между элементами ~5 мкм время переключения одного элемента составит всего ~0,1 нс. И перегрев структуры, пропорциональный квадрату плотности тока и обратно пропорциональный длительности импульса тока, будет совсем незначительным, всего лишь доли градуса.

Следует также отметить, что эффект «раскрытия» границы, ее превращения в домен с перпендикулярной намагниченностью, не наблюдается в монополоске пермаллоя, где скорость движения и переднего и заднего фронта границы совпадает и она много меньше скорости движения границы в бислойной структуре пермаллой/ниобий (рис. 3б). Аналогично, эффект не наблюдается в структурах пермаллой/медь и пермаллой/тантал, в которых скорости перемагничивания током по порядку величины совпадают со скоростью перемагничивания монополоски пермаллоя. К сожалению, вопрос о природе эффекта все еще открыт.

Работа выполнена в ИФТТ РАН при частичной поддержке программой Президиума РАН «Актуальные проблемы физики низких температур».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Parkin Stuart S.P., Hayashi Masamitsu, Thomas L.** Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory // *Science*. 2008. V. 320(5873). P. 190–194.
2. **Katine J.A., Fullerton Eric E.** Device implications of spin-transfer torques // *Journ. Magn. Mater.* 2007. V. 320. P. 1217–1226.
3. **Brataas A., Kent A.D., Ohno H.** Current-induced torques in magnetic materials // *Nature Mater.* 2012. V. 11. P. 372–381.
4. **Brataas A., Hals K.M.D.** Spin-orbit torque in action // *Nature Nanotechnology*. 2014. V. 9. P. 86–88.
5. **Marrows C.H.** Spin-polarized currents and magnetic domain walls // *Advances in Physics*. 2005. V. 54. P. 585–713.
6. **Tatara G., Kohno H., Shibara J.** Microscopic approach to current-driven domain wall dynamics // *Physics Reports*. 2008. V. 468. P. 213–301.
7. **Eschrig M.** Spin-polarized supercurrents for spintronics: a review of current progress // *Rep. Prog. Phys.* 2015. V. 78. P. 104501 (50pp).
- 7а. **Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Панас А.И., Эпштейн Э.М.** Спинтроника: обменное переключение ферромагнитных металлических переходов при малой плотности тока // *УФН*. 2009. Т. 179. С. 359–368.
8. **Malinowski G., Boule O., Kläui M.** Current-induced domain wall motion in nanoscale ferromagnetic elements // *Journ. Phys. D*. 2011. V.44. P. 384005 (13pp).
9. **Boule O., Malinowski G., Kläui M.** Current-induced domain wall motion in nanoscale ferromagnetic elements // *Material Science and Engineering R*. 2011. V. 72. P. 159–187.
10. **Vernier N., Allwood D.A., Atkinson D., Cooke M.D., Cowburn R.P.** Domain wall propagation in magnetic nanowires by spin-polarized current injection // *Europhys. Lett.* 2004. V. 65. P. 526–532.
11. **Zhu M., Dennis C.L., McMichael R.D.** Temperature dependence of magnetization drift velocity and current polarization in Ni80Fe20 by spin-wave Doppler measurements // *Phys. Rev. B*. 2010. V. 81. P. 140407 (4pp)
12. **Yamaguchi A., Hirohata A., Ono T., Miyajima H.** Temperature estimations in a ferromagnetic Fe-Ni nanowire involving a current-driven domain wall motion // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2012. V. 24. P. 024201 (9pp)
13. **Zutic I., Fabian Ja., Das Sarma S.** Spintronics: Fundamentals and applications // *Rev. Mod. Phys.* 2004. V. 76. P. 323–410.
- 14а. The International Conference on Superconducting Quantum Technology, Moscow, July 30 – August 3, 2018. <http://sqt-conference.ru/program>
14. **Vernik I.V., Bol'ginov V.V., Bakursky S.V., Golubov A.A., Kupriyanov M.Yu., Ryazanov V.V., Mukhanov O.A.** Magnetic Josephson junctions with superconducting interlayer for cryogenic memory // *IEEE Trans. Appl. Superconduct.* 2013. V. 23. P. 1701208.
15. **Blamire M.G., Robinson J.W.** 025A. The interface between superconductivity and magnetism: understanding and device prospects // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2014. V. 26. P. 453201 (13 pp)
16. **Русанов А.Ю., Голикова Т.Е., Егоров С.В.** Изменение знака магниторезистивного эффекта в бислойных структурах сверхпроводник/ферромагнетик при смене типа доменной структуры в ферромагнетике // *Письма ЖЭТФ*. 2008. Т. 87. С. 204–209.

17. **Bolginov V. V., Rossolenko A. N., Shkarin A. B., Oboznov V. A., Ryazanov V. V.** Fabrication of optimized superconducting phase inverters based on superconductor-ferromagnet-superconductor-junctions // *Journal of Low Temp. Phys.* 2018. V. 190. P. 302–314.
18. **Golovchanskiy I. A., Bolginov V. V., Abramov N. N., Stolyarov V. S., Ben Hamida A., Chichkov V. I., Roditchev D., Ryazanov V. V.** Magnetization dynamics in dilute Pd_{1-x}Fe_x thin films and patterned microstructures considered for superconducting electronics // *Journ. Appl. Phys.* 2016. V. 120. P. 163902.
19. **Shcherbakova A. V., Fedorov K. G., Shulga K. V., Ryazanov V. V., Bolginov V. V., Oboznov V. A., Egorov S. V., Shkolnikov V. O., Wolf M. J., Beckmann D., Ustinov A. V.** Fabrication and measurements of hybrid Nb/Al Josephson junctions and flux qubits with π -shifters // *Supercond. Sci. Technology.* 2015. V. 28. P. 025009.
20. **Bannykh A. A., Pfeiffer J., Stolyarov V. S., Batov I. E., Ryazanov V. V., Weides M.** Josephson tunnel junctions with a strong ferromagnetic interlayer // *Phys. Rev. B.* 2009. V. 79. P. 54501.
21. **Егоров С. В., Бобков А. М., Бобкова И. В., Успенская Л. С.** Аномально высокая скорость индуцированного током движения доменных границ в бислойных структурах пермаллой-ниобий // *Письма ЖЭТФ.* 2015. Т. 101. С. 34–38.
22. **Uspenskaya L. S., Egorov S. V., Skidanov V. A.** Transformation of the domain wall structure in permalloy nanotape under electrical current pulses // *IEEE Transact. on Magn.* 2015. V. 51. P. 4300104.
23. **Uspenskaya L. S., Egorov S. V.** Current and field stimulated motion of domain wall in narrow permalloy stripe // arXiv:1512.01372 [cond-mat. mes-hall]
24. **Егоров С. В., Успенская Л. С.** Кинетика переманичивания микрополосок пермаллой-ниобий под действием импульсов магнитного поля и тока // *Письма ЖЭТФ.* 2016. Т. 103. С. 298–302.
25. **Uspenskaya L. S., Tikhomirov O. A., Bozhko S. I., Egorov S. V., Chugunov A. A.** Domain structure and magnetization of the permalloy/niobium bilayers // *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. P. 163907.

ЭФФЕКТ РАЗДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ПАР ФРЕНКЕЛЯ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ СТРУКТУР $\text{SiO}_2\text{-Si}$

► Г. В. Баранов^{1,2}, А. Г. Итальянцев¹, К. Д. Щербачев³

¹АО «НИИМЭ», ²МФТИ (ГУ), ³НИТУ «МИСиС»

В работе исследуются особенности накопления первичных радиационных дефектов, образованных при имплантации структуры $\text{SiO}_2\text{-Si}$ с проецированным пробегом ионов, равным глубине залегания границы раздела фаз. Методами рентгеновской дифрактометрии обнаружен эффект устойчивого разделения первичных дефектов на границе $\text{SiO}_2\text{-Si}$, приводящий к уникальной для радиационной физики ситуации пересыщения Si только по собственным междоузельным атомам.

THE EFFECT OF FRENKEL PAIRS COMPONENTS SEPARATION DURING ION IMPLANTATION INTO $\text{SiO}_2\text{-Si}$ STRUCTURE

G. V. Baranov^{1,2}, A. G. Italyantsev¹, K. D. Shcherbachev³

¹MERI SC, ²MIPT, ³NUST MISIS

The features of radiation defects distribution after ion implantation of the $\text{SiO}_2\text{-Si}$ structure with a projected ion range equal to the depth of the interface are investigated. The effect of a stable radiation defects separation at the $\text{SiO}_2\text{-Si}$ interface which leads to the interstitial supersaturation of Si is observed using X-ray diffractometry.

ВВЕДЕНИЕ

Ионная имплантация является основным методом контролируемого введения в полупроводники примесных атомов и дефектов [1]. Известно, что при ионной имплантации в Si происходит пространственное разделение профилей распределения компонентов первичных пар Френкеля: радиационных вакансий (V) и собственных междоузельных атомов Si (I) [2–6]. Из общих положений теории пробегов и образования дефектов следует, что такая ситуация свойственна не только для кремниевой решетки, но и для других фаз. Однако в дальнейшем, в ходе постимплантационного отжига диффузионные и рекомбинационные процессы в значительной степени нивелируют этот эффект. Между тем, если бы удалось его сохранить, создавались бы совершенно иные условия для радиационно стимулированной диффузии имплантированной примеси и, в конечном счете, для формирования распределения примеси в ионнолегированном слое.

В [7] теоретически предсказано, что в случае имплантации ионов со средним проецированным пробегом в области границы раздела фаз системы

$\text{SiO}_2\text{-Si}$ такая закономерность приведет к устойчивому разделению областей обогащенных I и V. При этом слой SiO_2 будет перенасыщен вакансиями, а Si – междоузельными атомами. Важно отметить, что в отличие от гомогенного образца кремния, в гетерогенной структуре Si-SiO₂ дальнейшему перемещению и взаимной рекомбинации V в бинарной решетке SiO₂ и I в Si будут препятствовать их различная природа, граница раздела и относительно малая подвижность V в SiO₂. Кроме того, перед постимплантационным отжигом слой SiO₂ может быть удален. В итоге, можно рассчитывать на пересыщение кремния одним типом точечных дефектов, а именно собственными междоузлиями, что само по себе уже нетипично для радиационной физики дефектообразования. Такая искусственно сконструированная ситуация ведет к перспективам создания особых ионно-легированных профилей, а также к условиям формирования высокой плотности радиационно-термических дефектов в виде {113} стержней, которые могут быть использованы в качестве объекта «инженерии дефектов», например для получения фото- и катодолюминесценции [8,9] в кремниевых структурах без участия A³B⁵ материалов.

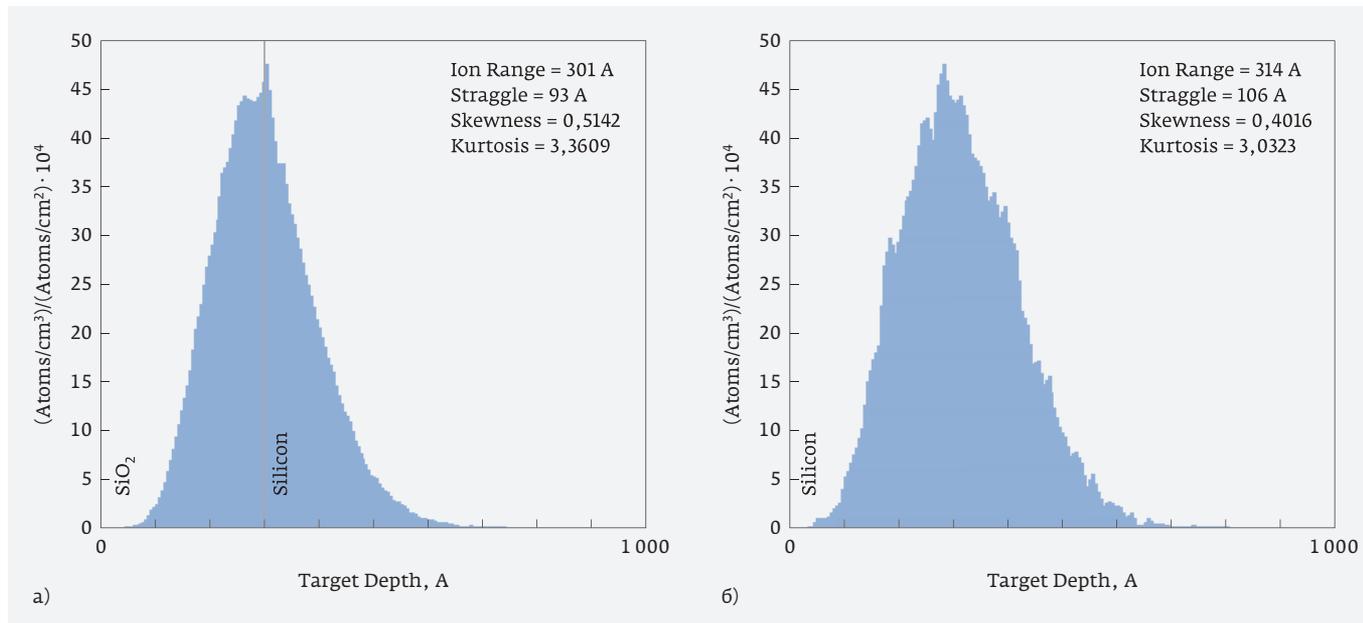


Рис. 1. Результаты моделирования в программной среде SRIM распределения ионов Kg^+ , имплантированных в структуру SiO_2-Si (а) и кремний (б)

Важно иметь в виду, что структурирование первичного дефектного фона в непосредственной близости от межфазной границы сильно подвержено влиянию стока дефектов из Si на границу раздела. В [10] показано, что такие поверхностные стоки имеют разную эффективность для V и I . С точки зрения значений релаксационных объемов точечных дефектов для кристалла наиболее выгоден уход на межфазную границу V . В [11] обнаружено, что для системы SiO_2-Si при толщине пленки 15–30 нм зона влияния межфазного стока на I составляет порядка 10 нм. Это означает, что при ионной имплантации структур SiO_2-Si в область межфазной границы сепарирование V из кремниевой решетки должно усиливаться еще и за счет преимущественного стока V на межфазную границу, обеспечивая еще более высокие пересыщения Si по I .

В данной работе методами рентгеновской дифрактометрии проведен анализ особенностей распределения I в Si, образованных при имплантации структуры SiO_2-Si с проецированным пробегом ионов, равным глубине залегания границы раздела в этой структуре.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Инертные ионы Kg^+ имплантировались в экспериментальную структуру SiO_2-Si и контрольный кристалл Si с энергией 40 кэВ и дозой 10^{13} см^{-2} под углом 7° . Кремний имел ориентацию (100) и удель-

ное электрическое сопротивление $1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$. Толщина слоя SiO_2 составляла 30 нм, что обусловлено попаданием среднего проецированного пробега ионов в границу раздела фаз, определенного на основании расчетов SRIM (рис. 1а). С целью оценки вклада механических напряжений в перераспределение дефектов в приповерхностной области Si, было изготовлено два типа экспериментальных структур: пленка SiO_2 формировалась путем термического окисления и методом PECVD. Термическое окисление проводилось в сухой среде при $T=920 \text{ }^\circ\text{C}$, что обуславливает возникновение в Si растягивающих механических напряжений порядка 200 МПа. Метод PECVD отличает то, что в этом процессе удастся сформировать пленки SiO_2 в отсутствие механических напряжений.

Дефектность ионноимплантированных слоев исследовалась методом рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения. Кривые дифракционного отражения (КДО) $Si(004)$ были измерены в режиме $\omega-2\theta$ сканирования. По форме КДО, используя оригинальную оптимизационную процедуру [12], основанную на алгоритме дифференциальной эволюции, было получено распределение повреждений по глубине слоя. Они описываются распределением по глубине z двух параметров: деформации в направлении нормали к поверхности образца $\epsilon_{zz}(z)$ и статического фактора Дебая – Валлера $L_H(z)$. L_H определяется среднеквадратическим

смещением (u^2) атомов из их узлов в деформированной кристаллической решетке и зависит от размера и числа кластеров первичных дефектов.

Для случая симметричного отражения Si(004) в соответствии с [6] могут быть определены Z-компоненты ϵ_{zz} и L_H :

$$L_H = \frac{8\pi\sqrt{2\pi}}{15V} h^{3/2} \cdot q_v^{3/2} \cdot c_{cl} \cdot \Delta V^{3/2}, \quad (1a)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{3} q_v \cdot c_{cl} \cdot \frac{\Delta V}{V}, \quad (1б)$$

где h – вектор дифракции; V – объем элементарной ячейки; q_v – коэффициент анизотропии, равный $C_{11}/(C_{11}+2C_{12})$ для направления [001] в кристаллах кубической сингонии (где C_{ij} – компоненты тензора упругости); c_{cl} – относительная концентрация кластеров; $\Delta V/V$ – удельное изменение объема кристалла при введении в него одного кластера.

Выражая из (1) c_{cl} и $\Delta V/V$ можно получить удобные для расчета выражения:

$$c_{cl} \approx 6,6 \cdot 10^4 \frac{\epsilon_{zz}^3}{L_H^2}, \quad (2a)$$

$$\frac{\Delta V}{V} \approx 3,1 \cdot 10^{-5} \frac{L_H^2}{\epsilon_{zz}^2}. \quad (2б)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Принимая во внимание значительное количество дефектов Френкеля, образующихся во время имплантации Kr^+ в кремний, можно ожидать присутствия растягивающих деформаций в нарушенном слое. Это подтверждается формой КДО для исследованных образцов (рис. 2). Максимум, соответствующий средней деформации слоя, находится слева (в области меньших углов) от пика подложки. Интенсивность этого максимума выше для случая имплантации в чистый кремний, поскольку толщина рассеивающего кристаллического слоя больше при имплантации в чистый кремний. При имплантации в структуру SiO_2-Si сохраняется асимметрия КДО в сторону отрицательных отклонений от берегового положения пика подложки, что свидетельствует о рассеянии преимущественно межузельными дефектами.

Причиной асимметрии КДО может являться и диффузное рассеяние рентгеновских лучей (ДРРЛ) на кластерах радиационных дефектов. Чтобы разделить вклад рассеяния на матрице с большим периодом решетки и на кластерах дефектов, были проведены измерения карт обратного пространства

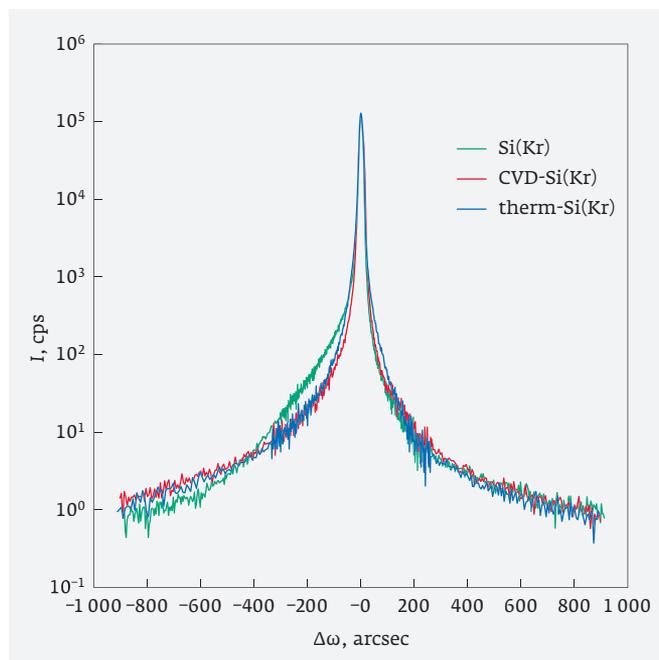


Рис. 2. Кривые дифракционного отражения (КДО), измеренные в окрестности узла Si(004). По оси абсцисс отложен угол отклонения от точного берегового положения для отражения Si(004)

в окрестности узла Si(004) (рис. 3). Измеренные КДО соответствуют сечению вдоль оси q_z на карте.

Локализация распределения интенсивности в обратном пространстве в окрестности оси q_z указывает на то, что асимметрия КДО вызвана рассеянием на слое с периодом решетки большим, чем период решетки кремния, из-за присутствия межузельных дефектов, растворенных в матрице. Интенсивность ДРРЛ, которое размыто в виде широкого гало вокруг узла, выше для случая имплантации в чистый кремний (рис. 3а), что свидетельствует как о большем объеме рассеивающего слоя, так и о присутствии кластеров радиационных дефектов. Оба эти фактора преобладают в случае имплантации в чистый кремний. Но вклад ДРРЛ в интенсивность КДО мал.

Анализ формы профилей распределения деформации $\epsilon_{zz}(z)$ и экспоненты статического фактора Дебая – Валлера $\exp(-L_H(z))$ показывает, что в случае имплантации в чистый кремний (рис. 4а) максимум деформации приходится на глубину ~ 20 нм, где приблизительно должен находиться максимум смещенных атомов. При этом наблюдается пространственное разделение вакансионных и межузельных дефектов, которое приводит к появлению слоя с отрицательной деформацией вблизи поверхно-

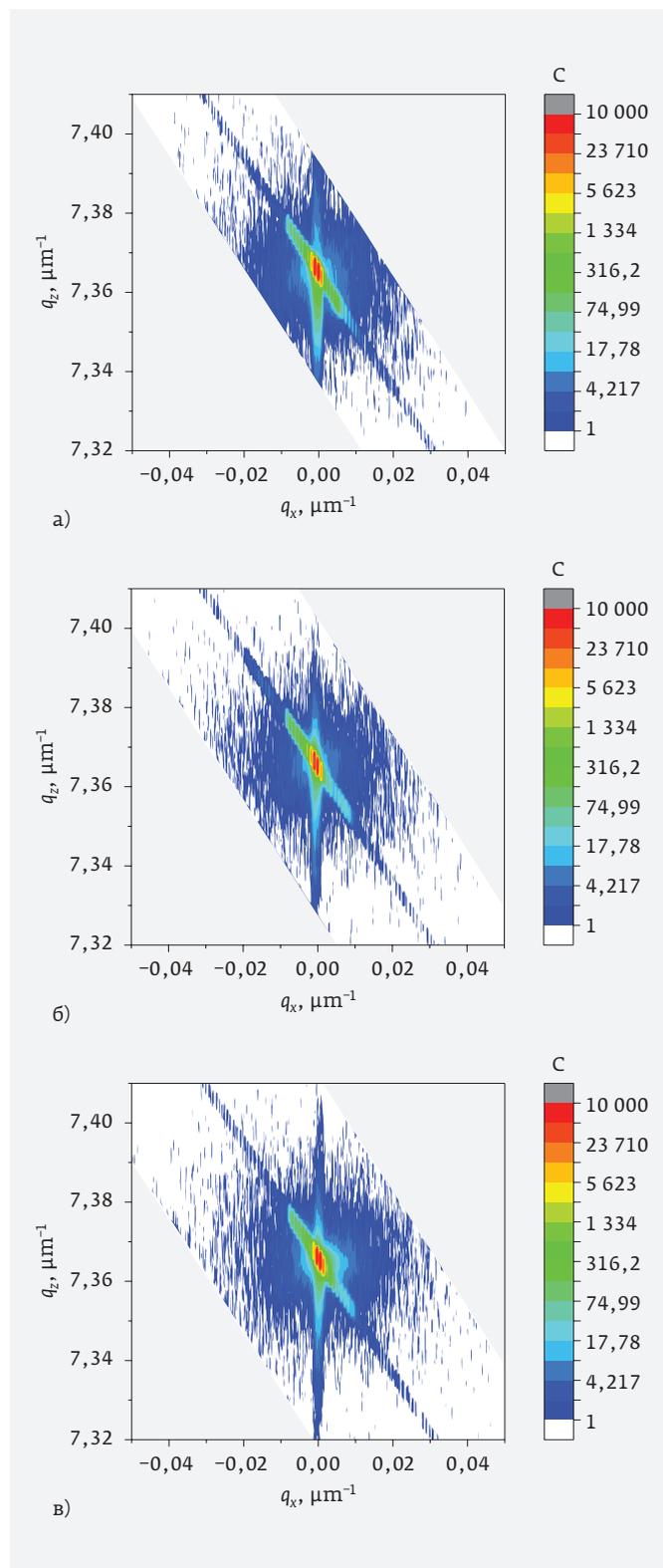


Рис. 3. Карты обратного пространства, измеренные в окрестности узла Si(004) обратной решетки, для контрольного образца Si (а) и экспериментальных структур SiO₂(PECVD)-Si (б) и SiO₂(терм.)-Si (в)

сти. Фактор Дебая – Валлера отличен от 1, что свидетельствует об агломерации радиационных дефектов в кластеры. Увеличение вследствие этого фона ДРРЛ отмечается на карте обратного пространства (рис. 3а).

В случаях имплантации в структуру с оксидными слоями наблюдается преобладание междоузельных атомов в кристаллической решетке кремния. Наряду с этим следует отметить наличие приповерхностного слоя толщиной 2–3 нм, обогащенного вакансионными дефектами. Это, возможно, связано с тем, что оксидный слой является источником как упругих, так и электрических полей. Фактор $\exp(-L_H)$ слабо отличается от 1 по всей глубине нарушенного слоя кремния, что свидетельствует о слабой ассоциации радиационных дефектов.

Проведем оценки концентраций растворенных междоузельных дефектов для двух типов структур на глубине 33 нм, что соответствует расстоянию примерно 3 нм от границы SiO₂-Si в структуре с оксидным слоем, где наблюдается максимум деформации.

Оценки, сделанные по формуле (2а) для Si и (1б) для экспериментальных структур дают значение относительной концентрации междоузельных дефектов в диапазоне $2\text{--}4 \cdot 10^{-3}$. Это указывает на то, что экспериментальная и контрольная структуры различаются только степенью агломерации радиационных дефектов. В случае имплантации в кремний дефекты формируют скопления порядка 75 междоузлий на кластер. Следует отметить, что эти оценки сделаны для области с малыми деформациями (порядка $\epsilon_{zz} = 0,0005$) и ошибка в значении степени агломерации междоузельных атомов может быть высока.

На рис. 5 приведено сравнение глубинных профилей распределения повреждений в ионноимплантированных слоях структуры SiO₂-Si и монокристалла Si. Распределение I в кремниевой решетке структуры SiO₂-Si хорошо накладывается на хвост распределения дефектов в монокристалле Si, что подтверждает модельные представления в части распределения радиационных дефектов в многослойных структурах. Небольшое отклонение от этой зависимости в области межфазной границы, по-видимому, связано со снижением рекомбинационных процессов в этой области, вызванным стоком радиационных вакансий в поверхностную область Si.

Анализируя поведение первичных дефектов в структурах SiO₂(PECVD)-Si и SiO₂(терм.)-Si, определено отсутствие влияния упругих полей на характер перераспределения дефектов в области межфазной границы.

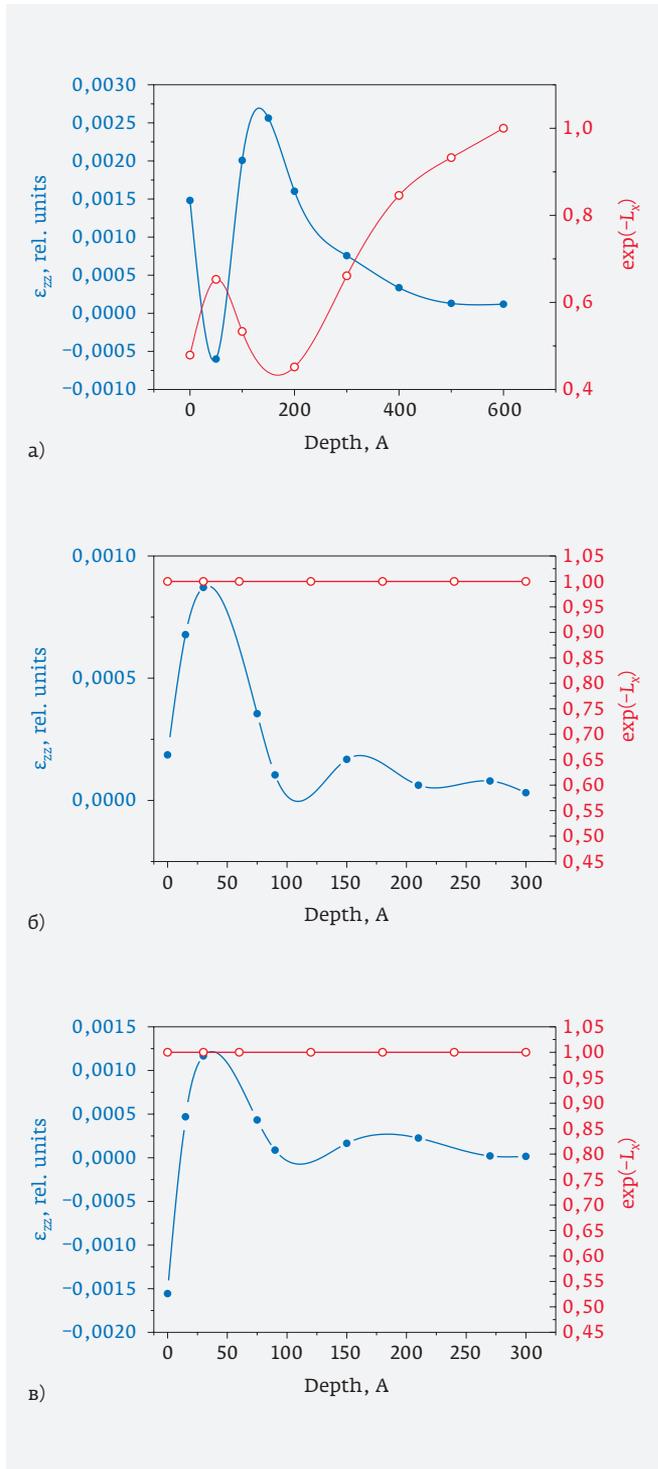


Рис. 4. Профили распределения деформации ϵ_{zz} (●) и показателя экспоненты статического фактора Дебая – Валлера $L_D(z)$ (○) для подложки Si(001) (а), структур SiO₂(PECVD)-Si (б) и SiO₂(терм.)-Si (в), имплантированных ионами Kr⁺. На рисунках (б) и (в) ноль по оси абсцисс соответствует положению границы SiO₂-Si

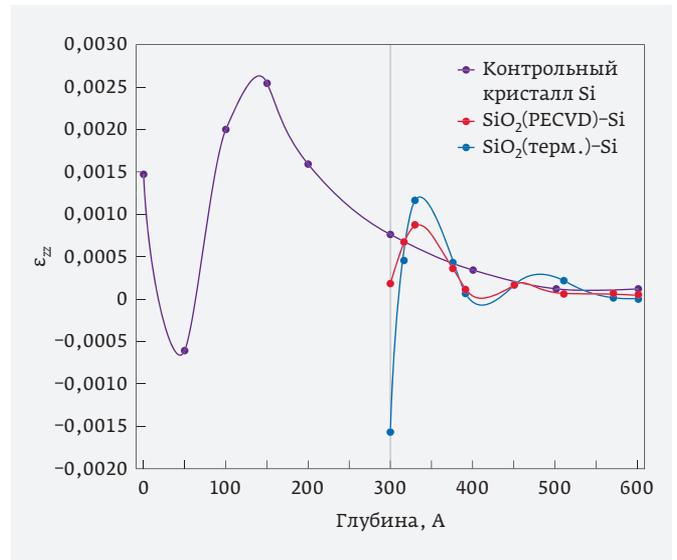


Рис. 5. Профили распределения деформации по глубине ионноимплантированных слоев экспериментальных образцов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ особенностей распределения первичных радиационных дефектов в Si, образованных при имплантации структуры SiO₂-Si со средним проецированным пробегом ионов, приходящимся на границу раздела фаз структуры. Методами рентгеновской дифрактометрии обнаружен эффект устойчивого разделения первичных дефектов на границе SiO₂-Si, приводящий к уникальной для радиационной физики ситуации пресыщения Si только по I-дефектам. Вследствие стока вакансий на межфазную границу тонкий приповерхностный слой Si обогащен V на фоне значительного преобладания I в объеме Si. Влияние упругих полей на характер перераспределения дефектов в области межфазной границы не обнаружено.

При используемых в работе параметрах имплантации, определяющих внедрение ионов с R_p , лежащим на границе раздела фаз SiO₂-Si, в кремниевой решетке находится ниспадающая часть профиля деформации. Для достижения более высоких пресыщений кремния по I-дефектам, по-видимому, средний проецированный пробег ионов должен находиться не на границе раздела фаз, а в области максимума упругих потерь энергии, то есть немного ближе к поверхности.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность ЦКП «Материаловедение и металлургия» НИТУ МИСиС за предо-

ставленную возможность проведения исследований на установке рентгеновской дифрактометрии.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Красников Г. Я., Зайцев Н. А.** Физико-технологические основы обеспечения качества СБИС. – М.: Микрон-принт, 1999. 226 с.
2. **Danilov Yu. I., Boudinov N., de Souza J. P., Drozdov Yu. N.** Spatial separation of: vacancy and interstitial defects formed in Si by oxygen-ion irradiation at elevated temperature // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. No. 7. 076106.
3. **Leveque P., Kortegaard Nielsen H., Pellegrino P., Hallen A., Svensson B. G., Kuznetsov A. Yu., Wong-Leung J., Jagadish C., Privitera V.** Vacancy and interstitial depth profiles in ion-implanted silicon // J. Appl. Phys. 2003. V. 93. No. 2. P. 871-877.
4. **Pellegrino P., Leveque P., Wong-Leung J., Jagadish C., Svensson B. G.** Separation of vacancy and interstitial depth profiles in ion-implanted silicon: Experimental observation // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. No. 22. P. 3442-3444.
5. **Abdelgader N., Evans-Freeman J. H.** High resolution electrical studies of vacancy-rich and interstitial-rich regions in ion-implanted silicon // J. Appl. Phys. 2003. V. 93. No. 9 P. 5118-5124.
6. **Щербачев К. Д., Бублик В. Т., Курипятник А. В., Мордкович В. Н., Пажин Д. М.** О влиянии фотовозбуждения in situ на структуру нарушенного слоя в подложках Si (111), имплантированных ионами аргона // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2003. № 1. С. 66-71.
7. **Баранов Г. В., Итальянцев А. Г., Песков Ш. Г.** Особенности перераспределения атомов As в Si при ионной имплантации структур SiO₂-Si // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2017. № 2. С. 4-10.
8. **Герасименко Н. Н., Михайлов А. Н., Козловский В. В., Запорожан О. А., Медетов Н. А., Смирнов Д. И., Павлов Д. А., Бобров А. И.** Структура и люминесценция кремния, облученного протонами // Перспективные материалы. 2013. № 8. С. 18-23.
9. **Соболев Н. А., Калядин А. Е., Шек И. Е., Сахаров В. И., Серенков И. Т., Вдовин В. И., Паршин Е. О., Маковийчук М. И.** Фотолюминесценция в кремнии, имплантированном ионами эрбия при повышенной температуре // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45. № 8. С. 1038-1040.
10. **Федина Л. И.** О рекомбинации и взаимодействии точечных дефектов с поверхностью при кластеризации точечных дефектов в Si // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. № 9. С. 1120-1127.
11. **Aseev A., Fedina L., Hoehl D., Barsch H.** Clusters of Interstitial Atoms in Silicon and Germanium. – Berlin: Academy Verlag, 1994. 152 p.
12. **Щербачев К. Д., Курипятник А. В., Бублик В. Т.** Применение трехкristальной рентгеновской дифрактометрии для исследования ионоимплантированных слоев // Заводская лаборатория. 2003. № 6. С. 23-31.

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ И ГЛУБИНЫ КОНТАКТОВ К СТОКУ / ИСТОКУ НА ПАРАМЕТРЫ 3D БЕСПЕРЕХОДНОГО МОП-ТРАНЗИСТОРА

► М. А. Королев, А. Ю. Красюков, Т. Ю. Крупкина, Ю. А. Чаплыгин
НИУ «МИЭТ»

В статье описаны результаты исследования влияния расположения контактных областей и их глубины на основные параметры 3D двухзатворного беспереходного МОП-транзистора средствами TCAD. Показано, что в случае вертикальной конструкции прибора короткостокковый эффект проявляется лишь при расстоянии между стоковым контактом и электродом затвора менее 25 нм и усиливается при увеличении глубины контактной области. Приведено объяснение полученных зависимостей.



3D DOUBLE-GATE JUNCTIONLESS MOSFET

М. А. Korolev, А. Yu. Krasukov, Т. Yu. Krupkina, Yu. А. Chaplygin
NRU MIET

Dependences of spacer length and junction depth on electrical parameters for double-gate junctionless transistor were calculated using Sentaurus TCAD simulation package. It was shown in double-gate junctionless MOSFET, short-drain effect appears only at spacer length less than 25 nm. This effect enhanced with increase in junction depth.

ВВЕДЕНИЕ

МОП-беспереходные транзисторы (БПТ), впервые описанные в 2010 году [1], обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными (инверсионными) приборами вследствие простоты конструкции и менее сложного технологического процесса их изготовления [2]. Однако из-за высокой концентрации примеси в рабочем теле прибора у таких транзисторов нанопроволочной конструкции наблюдается высокий уровень подпороговых токов, обусловленный межзонным туннелированием в области перехода канал-сток [3–6]. От этого недостатка свободен предложенный в работе [7] КНИ-МОП-БПТ планарной конструкции с пониженной концентрацией примеси в пленке кремния и имеющий дополнительные сильно легированные области контактов к истоку и стоку. Вместе с тем такие планарные приборы имеют достаточно большую площадь. Решение этой проблемы представлено в работе [8], где описана 3D-структура двухзатворного МОП БПТ, показанная на рис. 1, и проведен сравнительный рас-

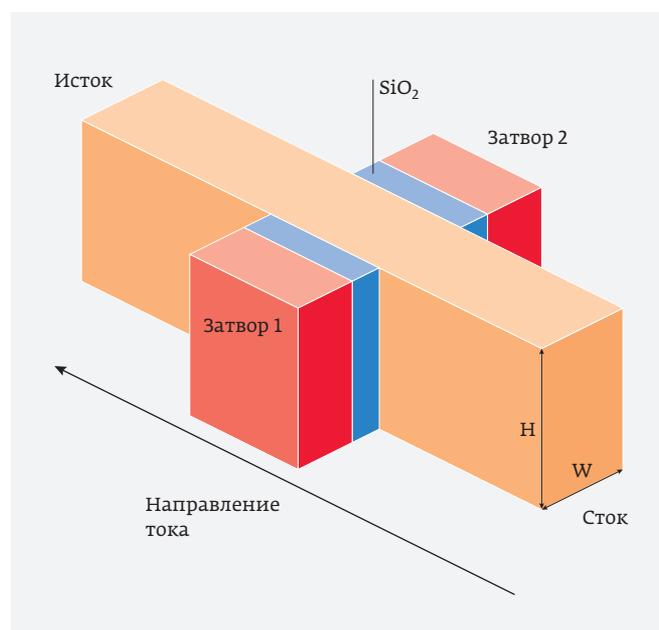


Рис. 1. 3D двухзатворный МОП-транзистор

чет параметров такого транзистора, показавший его преимущества перед инверсионным 3D двухзатворным прибором.

При расчетах в этой работе была принята постоянная величина расстояния между электродом затвора и областями p⁺-контактов к стоку и истоку. Однако, как показано в работе [7], при расстоянии менее 100 нм между электродом затвора и областями p⁺-контактов у планарного МОП БПТ происходит резкая деградация основных параметров прибора из-за возникновения короткостокowego эффекта, обусловленного влиянием

ОПЗ контакта на зарядовое состояние канала. С этой точки зрения представляет несомненный интерес исследование влияния расположения p⁺-контактов и на параметры 3D двухзатворного МОП БПТ типа FinFET, обладающего известными преимуществами по сравнению с планарным вариантом прибора.

Кроме того, в предыдущих работах, посвященных исследованию планарного МОП БПТ, при расчетах использовались торцевые p⁺-контакты к областям стока и истока, то есть проникающие через всю толщину пленки кремния. Возможно, что глубина

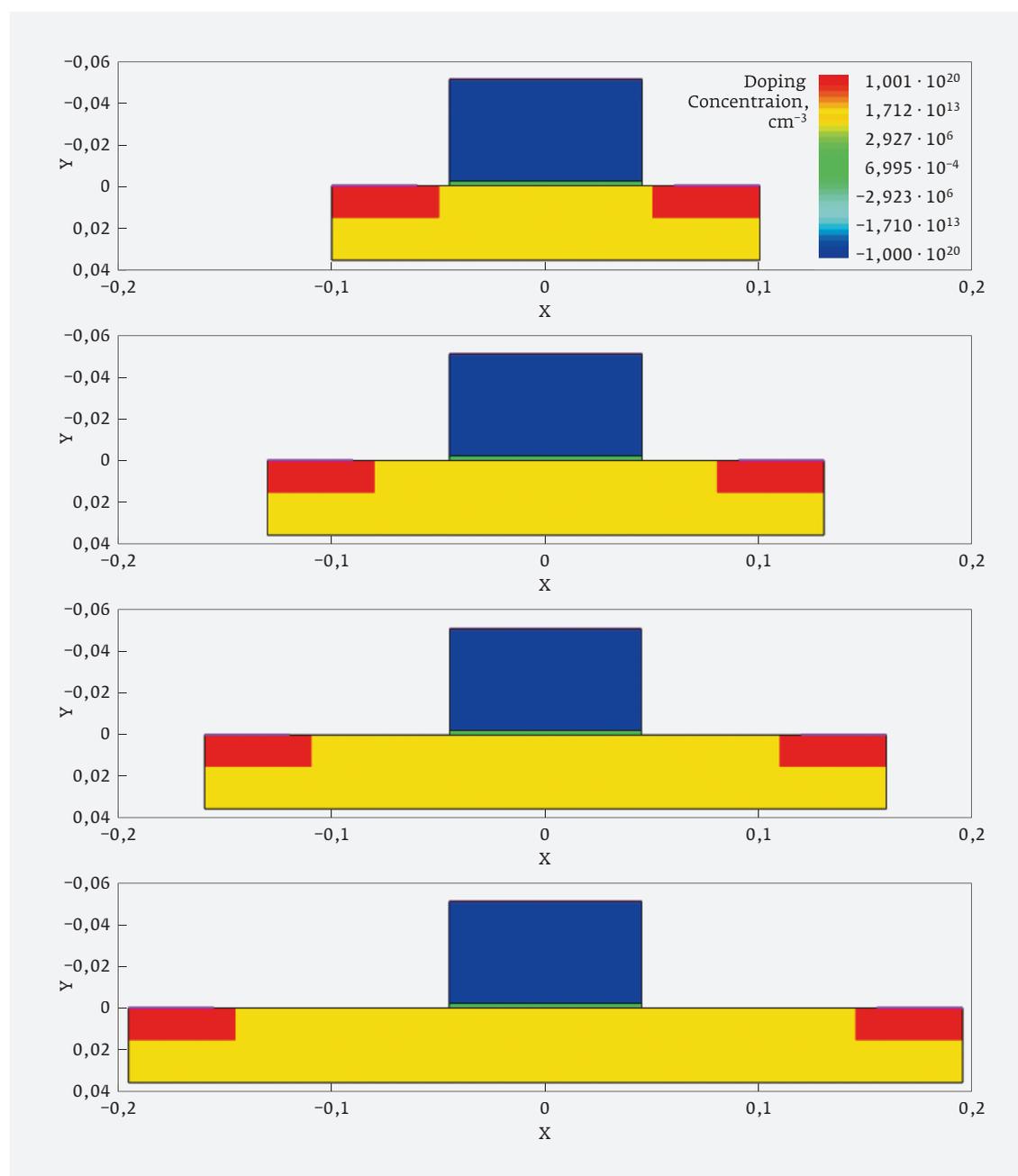


Рис. 2. Двухмерные модели беспереходных транзисторов для оценки влияния длины спейсера на параметры прибора

проникновения контактов влияет на распределение электрического поля n^+ - n -перехода контакта, ответственного за короткостокковый эффект. Поэтому в данной статье приведены результаты исследования и в этом направлении.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ n^+ -КОНТАКТА И ДЛИНЫ СПЕЙСЕРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БПТ

При моделировании были приняты следующие параметры структуры прибора, соответствующие технологии 90 нм:

- длина затвора: $L_g = 90$ нм, p^+ - Si^+ , $N = 10^{20} \text{ см}^{-3}$;
- толщина Si-плавника: $H_{Si} = 70$ нм, $N_{Si} = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$;
- подзатворный SiO_2 , $D_{ox} = 2,1$ нм;
- расстояние от края электрода затвора до n^+ -области контакта (спейсер): $L_{сп} = 5-100$ нм;
- контакты к истоку, стоку расположены сверху n^+ -областей или проникались в глубину кремния.

На рис. 2-3 представлены модели 3D двухзатворного МОП БПТ для расчета электрических параметров прибора с учетом изменения глубины n^+ -контактной области (X_j) и длины спейсера ($L_{сп}$).

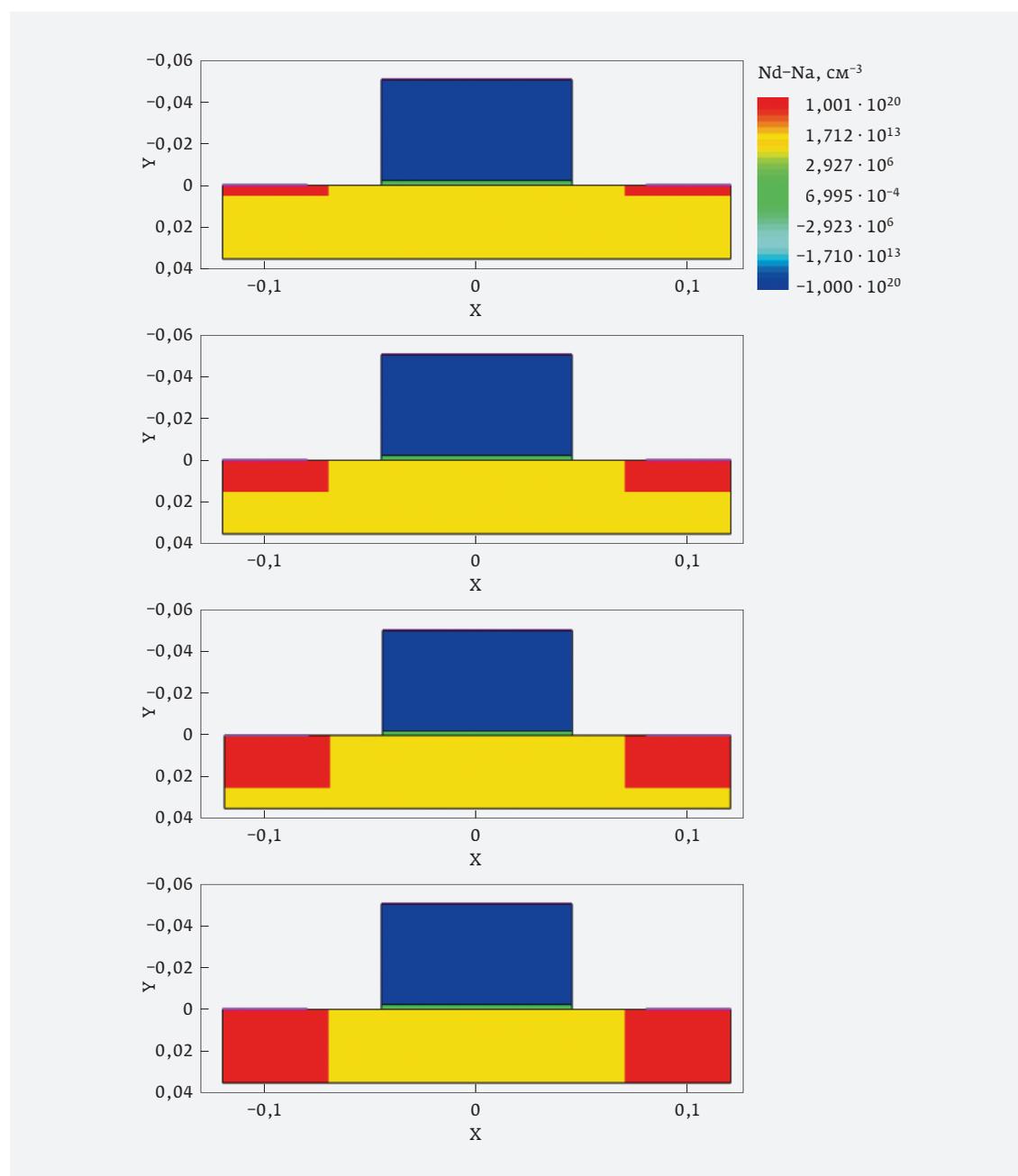


Рис. 3. Двухмерные модели беспереходных транзисторов для оценки влияния глубины n^+ -областей на параметры прибора

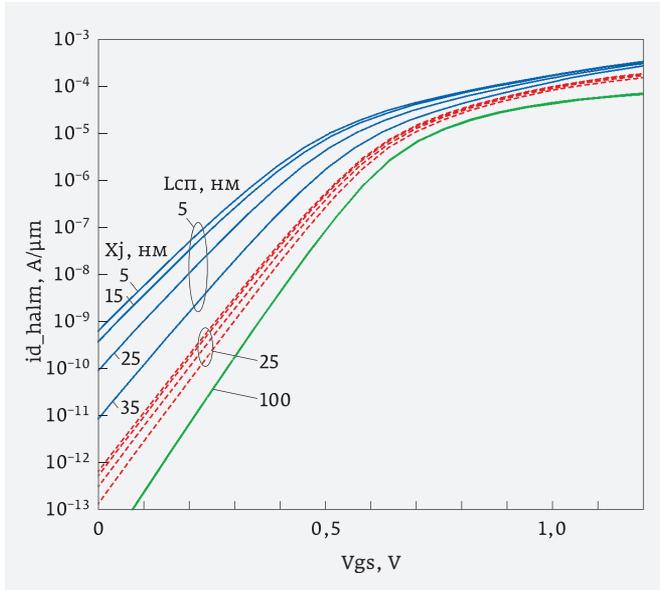


Рис. 4. Проходные ВАХ БПТ при разных длинах спейсера и глубинах n⁺-областей

Расчет проходных ВАХ при напряжениях стока $V_{си} = 0,1$ и $1,2$ В проводился с использованием пакета Sentaurus TCAD [9–10]. В расчете использованы следующие модели: гидродинамическая модель для электронов; модель квантования энергии носителей в канале и модель межзонной генерации.

Определялись следующие электрические параметры транзистора:

- пороговое напряжение при $V_{си} = 0,1$ и $1,2$ В, (при $I_c = 0,1$ мкА/мкм);
- ток насыщения, $I_{сн}$ ($V_{си} = 1,2$ В);
- ток утечки, $I_{ут}$ ($V_{зи} = 0$, $V_{си} = 1,2$ В);

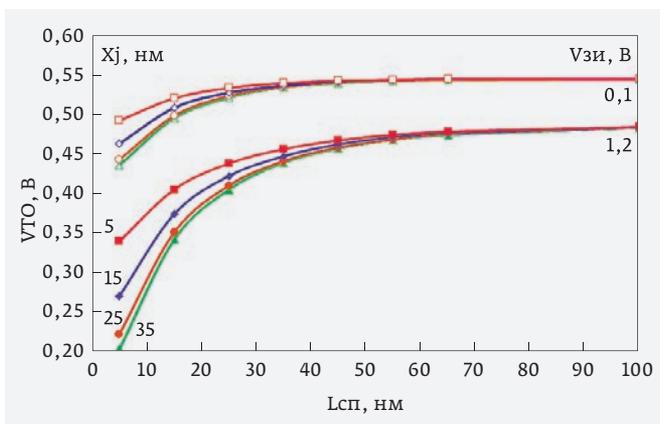


Рис. 5. Зависимость порогового напряжения от длины спейсера и глубины n⁺-области

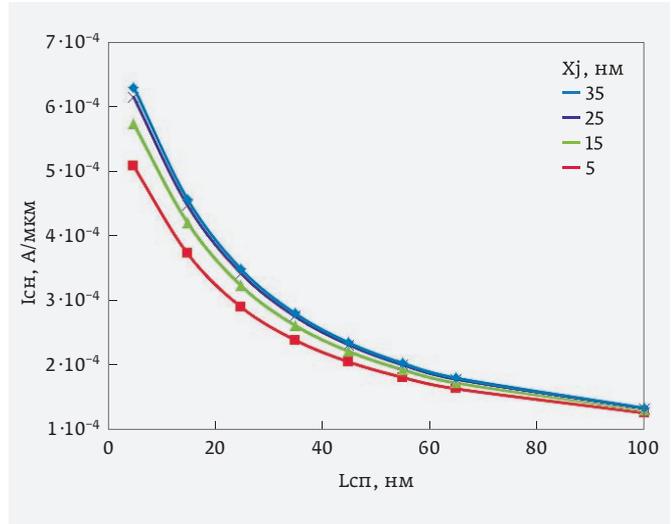


Рис. 6. Зависимость тока насыщения от $L_{сп}$ и X_j

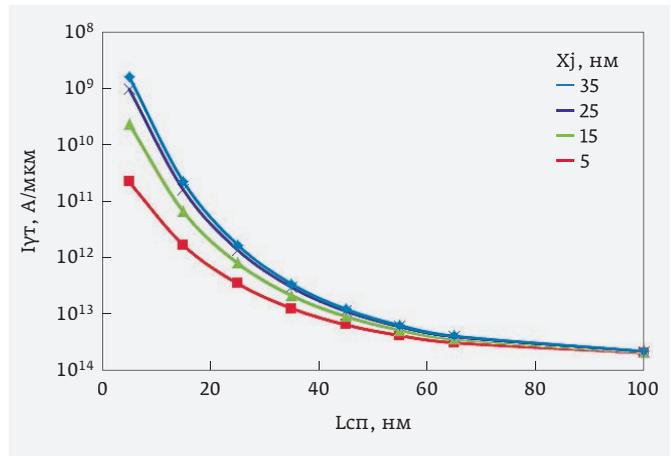


Рис. 7. Зависимость тока утечки от $L_{сп}$ и X_j

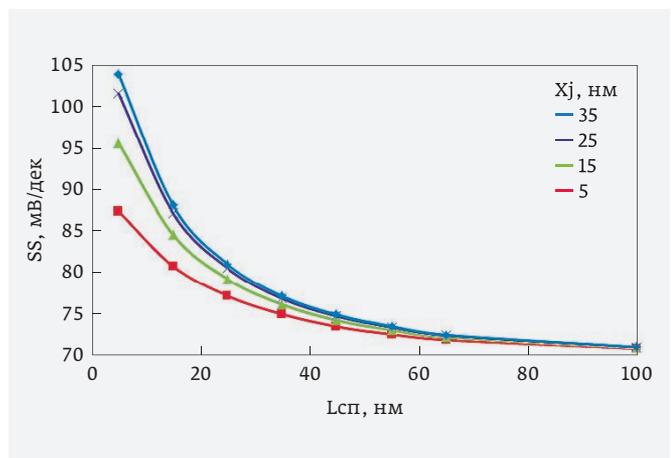


Рис. 8. Зависимость подпорогового наклона от $L_{сп}$ и X_j

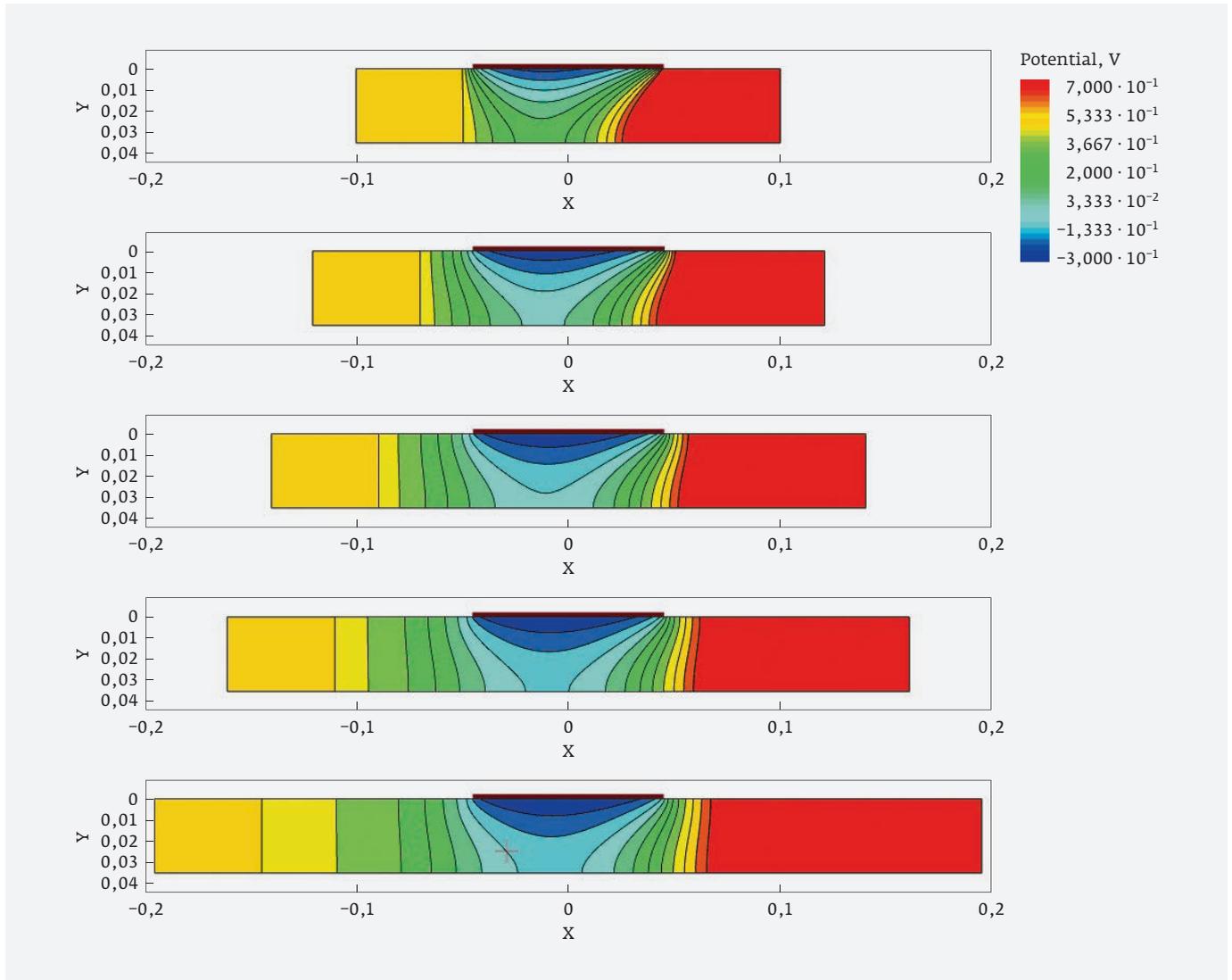


Рис. 9. Распределение потенциала в теле беспереходного транзистора при $X_j = 35$ нм и $L_{sp} = 5; 25; 45; 65$ и 100 нм. Затвор не показан

- подпороговый наклон ВАХ, SS ($V_{зи} = 0,01$ В, $V_{си} = 1,2$ В).

С использованием разработанных моделей были построены проходные ВАХ, представленные на рис. 4. Как следует из приведенных графиков при уменьшении расстояния электрод затвора – контакт к стоку и увеличении глубины области контакта резко снижается пороговое напряжение и увеличивается подпороговый ток транзистора.

Обработка графиков рис. 4 позволила построить зависимости порогового напряжения (рис. 5), тока насыщения (рис. 6), тока утечки (рис. 7) и подпорогового наклона (рис. 8) от длины спейсера, определяющего в самосовмещенном процессе формирования МОП-транзистора расстояние между электро-

дом затвора и контактом к p^+ -области стока/истока, а также от глубины p^+ -области контакта.

Из графиков следует, что при уменьшении расстояния между электродом затвора и областью p^+ -контакта менее 25 нм происходит деградация параметров транзистора: резкое уменьшение порогового напряжения и увеличение подпорогового тока, тока насыщения и подпорогового наклона. Такие закономерности можно объяснить влиянием ОПЗ n^+-p – перехода контакта к стоку на зарядовое состояние канала – короткостокковый эффект.

На рис. 9–10 представлены распределение потенциала и концентрации электронов в теле прибора при $X_j = 35$ нм и разных длинах спейсера $L_{sp} = 5; 25; 45; 65$ и 100 нм. Наглядно видно, что при расстоянии 5 нм

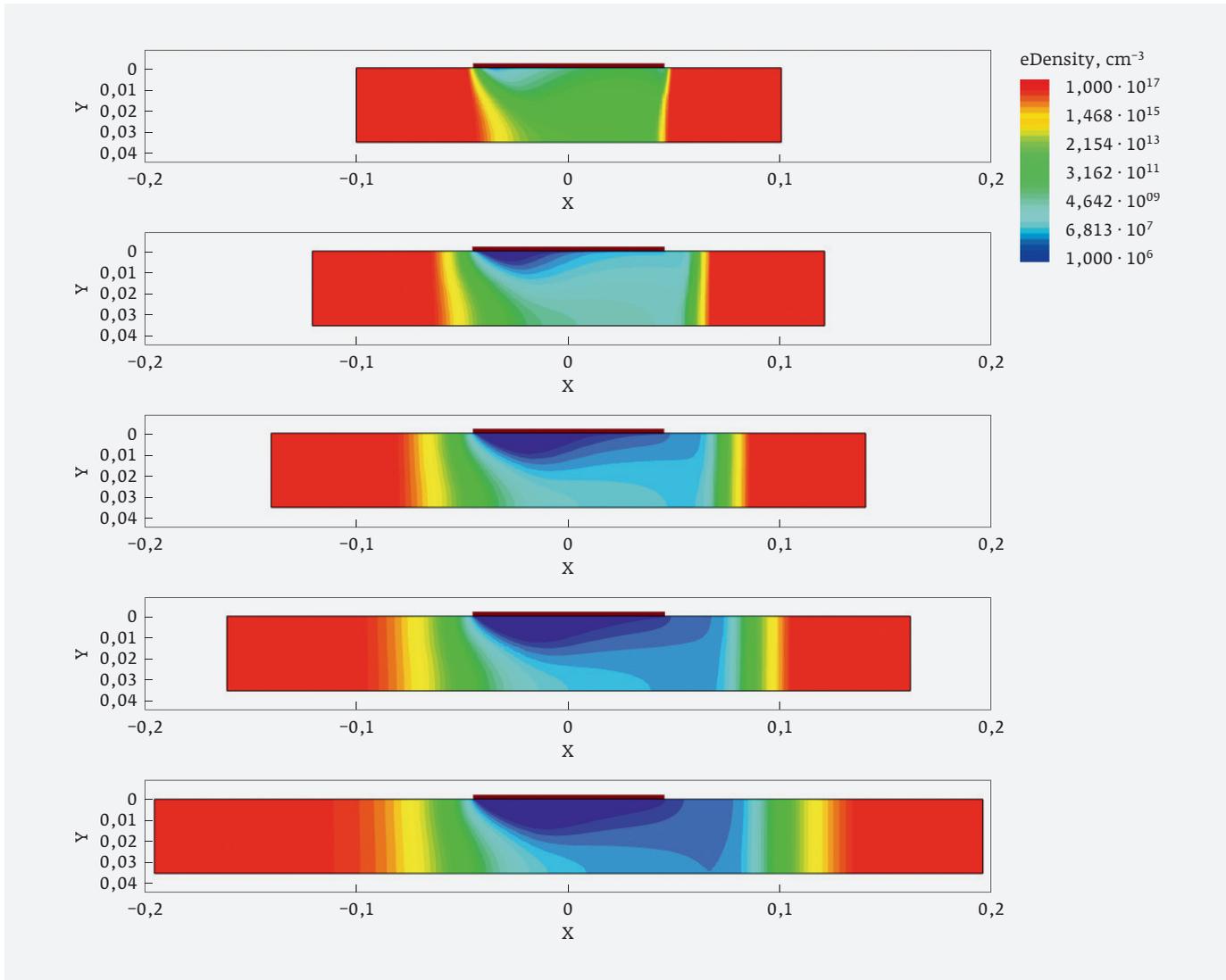


Рис. 10. Распределение концентрации электронов в теле беспереходного транзистора при $X_j = 35$ нм и $L_{sp} = 5; 25; 45; 65$ и 100 нм

потенциал стока проникает в подзатворную область, уменьшая длину канала (проявляется короткостокочный эффект). При этом при $L_{sp} > 45$ нм такого проникновения не происходит. Также из рис. 9-10 видно, что сильнее всего потенциал стока проникает в канал в средней части тела беспереходного транзистора.

На рис. 11-12 представлены распределение потенциала и концентрации электронов в теле прибора при $L_{sp} = 25$ нм и разных глубинах залегания p^+ -областей $X_j = 5; 15; 25$ и 35 нм. Наглядно видно, что при $X_j = 5$ нм потенциал стока проникает в подзатворную область слабее всего, а при $X_j = 35$ нм (когда p^+ -область стока расположена по всей толщине тела транзистора) такое проникновение проявляется наиболее сильно.

Анализируя приведенные результаты моделирования можно сделать вывод, что при переходе от планарной к трехмерной с двумя затворами структуре у МОП БПТ снижается влияние короткостокочного эффекта на параметры прибора: допустимое минимальное расстояние между электродом затвора и контактом к стоку уменьшается от 100 до 25 нм. Данную закономерность можно объяснить тем, что у 3D МОП БПТ при том же пороговом напряжении более высокая концентрация примеси в канале, что ограничивает глубину проникновения электрического поля перехода контакта стока в область канала, а использование двухзатворной структуры, снижающей эффективную толщину подложки в два раза, приводит к более сильному

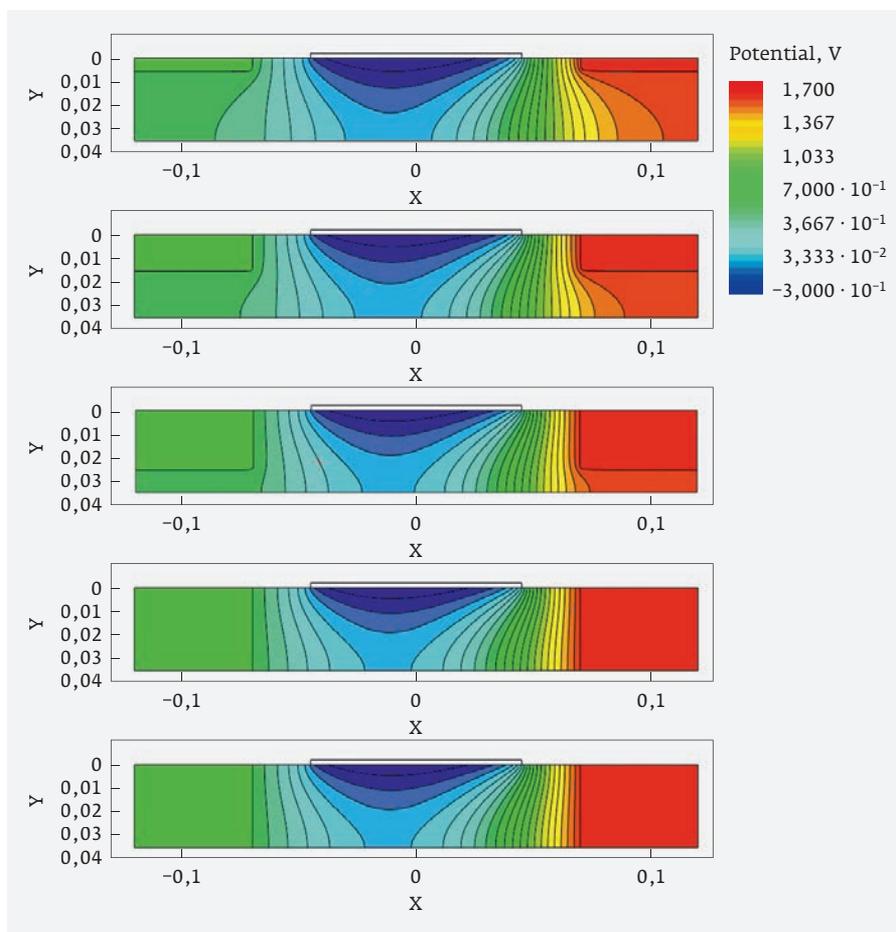


Рис. 11. Распределение потенциала в теле беспереходного транзистора при $L_{sp}=25$ нм и разных $X_j=5; 15; 25$ и 35 нм. Затвор не показан

обеднению плавника прибора носителями заряда при нулевом напряжении на затворе и соответственно уменьшает степень влияния поля перехода контакта на параметры транзистора.

Что касается влияния глубины контакта на параметры МОП БПТ – транзистора, то этот эффект можно объяснить тем, что при увеличении глубины контакта соответственно увеличивается торцевая площадь контактной области, электрическое поле которой направлено в сторону канала и пропорционально этой площади, что и приводит к усилению короткостокowego эффекта.

ВЫВОДЫ

С помощью приборно-технологического моделирования в программной среде TCAD исследовано влияние расположения контактных областей и их глубины на основные параметры 3D двухзатворного МОП БПТ и установлено, что короткостоковой эффект, проявляющийся в виде резкой деградации основных параметров прибора, проявляется лишь при расстоянии между стоковым контактом и электродом затвора менее 25 нм, что в четыре раза меньше, чем для планарного варианта транзистора и усиливается при увеличении глубины контактной p^+ -области. Полученные закономерности объяснены влиянием

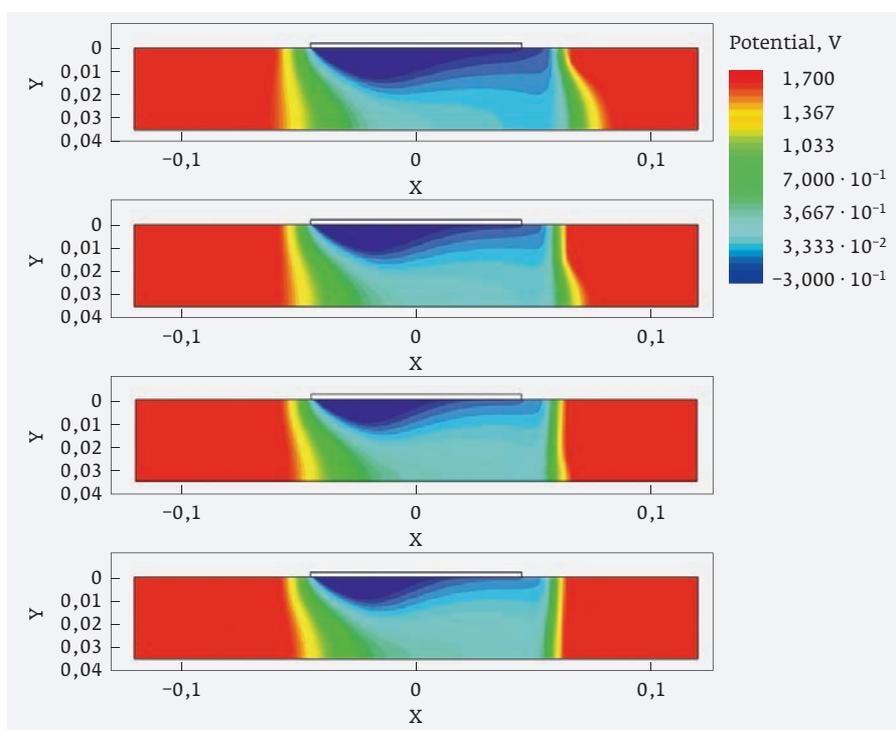


Рис. 12. Распределение концентрации электронов в теле беспереходного транзистора при $L_{sp}=25$ нм и разных $X_j=5; 15; 25$ и 35 нм

повышенной концентрации примеси в кремнии и наличием двух противоположно расположенных затворов на взаимодействие электрического поля перехода стокового контакта и зарядового состояния канала прибора. Влияние глубины контакта на короткостокковый эффект объяснено увеличением торцевой площади контактной области, электрическое поле которой направлено в сторону канала и пропорционально ее размерам.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lee C., Afzalian A., Colinge J., Yan R., Ferain I., Akhavan N.** Multigate junctionless field-effect transistor // *Appl. Phys. Lett.* 1991. Vol. 94. No. 5.
2. **Rios R., Cappellani A., Armstrong M., Budrevich A., Gomez H., Pai R., Rahhal-orabi N., Kuhn K.** Comparison of junctionless and conventional trigate transistors with lg down to 26 nm // *IEEE Electron Device Letters*, 2011. Vol. 32. P. 1170-1172.
3. **Park C., Ko M., Kim K., Sohn C., Baek C., Jeong Y., Lee J.** Comparative study of fabricated junctionless and inversion-mode nanowire FETs // *Proceedings 69 Annual Device Research Conference*, Santa Barbara, CA. 2011. P. 179-180.
4. **Gundapaneni S., Lin Z., Kottantharayil A. and Ganguly S.** Electrostatic integrity enhanced of short channel transistor junctionless with high-k spacers // *IEEE Electron Device Lett.* 2011. Vol. 32. No. 10. PP. 1325-1327.
5. **Moon D., Choi Y., Kim S., Duarte J. and Cappellani A.** Threshold voltage sensitivity to width variation nanowire in JLT // *IEEE Electron Device Lett.* 2016. Vol. 32. No. 2. PP. 125-127.
6. **Su C., Tsai T., Liou Y., Chao T., Lin Z. and Lin H., Moon D.** Around gate transistors junctionless heavily doped with nanowire channels polysilicon // *IEEE Electron Device Lett.* 2011. Vol. 32. No. 4. PP. 521-523.
7. **Королев М.А., Чаплыгин Ю.А., Ключников А.С., Ефимова Д.И.** Планарный КНИ беспереходной МОП-транзистор // *Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника.* 2018. Вып. 1 (169). С. 5-13.
8. **Чаплыгин Ю.А., Крупкина Т.Ю., Королев М.А., Красюков А.Ю., Артамонова Е.А.** Сравнительный анализ двухзатворных беспереходного и традиционного МОП-транзисторов средствами TCAD // *Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем-2018. Сборник трудов.* – М.: ИППМ РАН, 2018. Часть IV. С. 10-15 (будет опубликовано в октябре 2018).
9. **Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Чаплыгин Ю.А.** Приборно-технологическое моделирование при разработке изделий микроэлектроники и микросистемной техники // *Известия высших учебных заведений. Электроника.* 2005. № 4-5. С. 64-71.
10. **Глушко А.А.** Приборно-технологическое моделирование в системе TCAD Sentaurus // *Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015. 64 с.

СПОСОБ УДАЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИЗ ВХОДНОГО СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОГО ЗАШУМЛЕНИЯ И АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

► А. С. Шалимов
НИУ «МИЭТ»

Целью исследования является разработка способа выделения полезного сигнала, поступающего с первичных преобразователей физических величин, таких как МЭМС, из сигнала, представляющего собой результат эксперимента.

Отсутствие полной и достоверной информации о характере полезного сигнала и шума при условии, что обе указанные составляющие находятся в одном и том же частотном диапазоне, обуславливает определенные трудности при работе с сигналами, поступающими с подобных источников. Это определяет актуальность разработки такого способа фильтрации, который даст возможность выделения полезного сигнала в условиях априорной неопределенности. Данный способ может представлять интерес практически во всех областях современной техники, использующей в качестве первичного источника сигнала данные, поступающие с датчиков, выполняющих измерение параметров физических величин, предсказание точных значений которых не представляется возможным.

Для решения поставленной задачи представляется целесообразным обратиться к теории выбросов случайных процессов и на базе существующих решений сформулировать новый подход путем выдвижения гипотезы о наличии функциональной связи между наименее вероятным значением длительности положительного выброса и периодом следования точек в реализации случайного процесса, степень зависимости которых является минимальной. Это дает возможность рассматривать результаты эксперимента в качестве реализации случайного процесса, подчиняющегося известному закону распределения, и сформулировать основные граничные условия, при выполнении которых предлагаемый способ будет универсален для широкого класса источников первичного сигнала.

METHOD OF ELIMINATION OF THE CONSTANT RANDOM COMPONENT FROM THE INPUT SIGNAL WITH SMALL SIGNAL-TO-NOISE RATIO UNDER PRIOR UNCERTAINTY CONDITIONS

A. S. Shalimov
NRU «MIET»

The present work describes the method of extraction of informative signal from primary converters of physical values such as MEMS, which represent the result of experiment.

Missing of reliable information about the type of informative signal and noise on the assumption of the identical frequency band for both of them, causes the appearance of difficulties during the processing of input signal. This determines the actuality of development of such method of extraction of informative signal, which will give the ability to work under prior uncertainty conditions. This method can be useful in different fields of science, which operates with data from sensors, performing the measure of physical values, which exact values cannot be predicted.

Described task can be solved with the help of theory of splashes of random values in order of developing new method on the base of the hypothesis of presence of relation between the most probable value of duration of positive splash and the period of signal count, with the minimum amount of dependence between this counts. This hypothesis gives the ability to analyze the results of experiment like the realization of random process, which can be described with one of the well-known distribution laws and to formulate the boundary conditions for achieving of universality of the present method.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе будем выполнять анализ основных статистических характеристик выбросов двумерного стационарного дифференцируемого случайного процесса $\xi(t)$, подчиняющегося нормальному закону распределения.

В частном случае, в качестве реализации случайного процесса $\xi(t)$ можно рассматривать входной сигнал, представляющий собой аддитивную смесь полезного сигнала и шума. Причем, особый интерес представляет задача выделения полезного сигнала из реализации $\xi(t)$ в том случае, когда полезный сигнал и шум находятся в одном и том же частотном диапазоне в условиях априорной неопределенности, что представляет особую важность при разработке МЭМС-датчиков [1-2]. В ряде работ [3-11] приведены аналогичные методы решения указанной задачи, каждый из которых успешно находит свое применение на практике при выполнении соответствующих условий, указанных авторами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках данной работы будем решать задачу выделения полезного сигнала из исходной смеси сигнала и шума, представляющей собой двумерный стационарный дифференцируемый случайный процесс $\xi(t)$, подчиняющийся нормальному закону распределения:

$$\xi(t) = s_1(t) + s_2(t), \quad (1)$$

где: $s_1(t)$ и $s_2(t)$ – сигналы, составляющие случайный процесс $\xi(t)$.

Рассмотрим пересечения реализации случайного процесса $\xi(t)$ на интервале времени (t_0, t_r) с уровнем $H(t) = H_i = \text{const}$, где t_0 – время начала реализации случайного процесса $\xi(t)$, а t_r – время окончания ре-

ализации случайного процесса $\xi(t)$ (рис. 1). Положительным выбросом будем называть такую часть реализации случайного процесса $\xi(t)$, которая находится над уровнем H_i . Провалом будем называть такую часть реализации случайного процесса $\xi(t)$, которая находится между двумя соседними положительными выбросами. Длительность положительного выброса обозначим с помощью переменной τ , а длительность провала обозначим с помощью переменной θ .

Обратимся к известным выражениям для средних значений τ и θ [6]:

$$\bar{\tau}(C_i) = \frac{2\pi}{\sqrt{-R_0}} (1 - \Phi(C_i)) e^{\frac{C_i^2}{2}}, \quad (2)$$

$$\bar{\theta}(C_i) = \frac{2\pi}{\sqrt{-R_0}} \Phi(C_i) e^{\frac{C_i^2}{2}}, \quad (3)$$

$$C_i = \frac{H_i}{\sqrt{D}}, \quad (4)$$

где: C_i – нормированный уровень H_i ;

$\bar{\tau}(C_i)$ – средняя длительность положительного выброса;

$\bar{\theta}(C_i)$ – средняя длительность провала;

D – дисперсия случайного процесса $\xi(t)$;

$\Phi(C_i)$ – интегральная функция распределения вероятности.

Сделаем предположение о том, что сумма наиболее вероятнейших значений (мод) τ и θ , найденных согласно (2) и (3), равна периоду следования точек в реализации случайного процесса $\xi(t)$, которые являются статистически независимыми друг от друга:

$$T_{\max} = \frac{\tau_c}{1 - \Phi(C_i)} = \frac{\tau_c}{\Phi(-C_i)}. \quad (5)$$

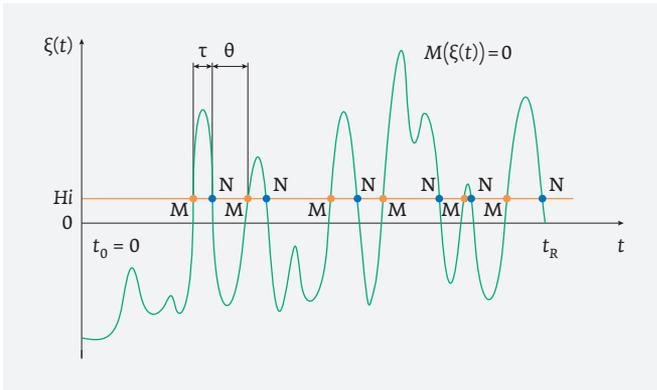


Рис. 1. Выбросы и провалы реализации случайного процесса

С другой стороны, в случае анализа больших положительных значений нормированного уровня C_i выражение для плотности вероятности длительности положительного выброса может быть записано в виде [6]:

$$W(\tau, C_i) = -\frac{1}{4} R_0'' C_i^2 \tau \cdot e^{\frac{1}{8} R_0'' C_i^2 \tau}. \quad (6)$$

Несмотря на наличие обозначенного выше ограничения при использовании (6), проанализируем возможность применения данной функции для всех значений τ .

Используя условие нормировки, получим:

$$\hat{P}_{max} = -\int_{\tau_0}^{\tau_k} \frac{R_0'' C_i^2 \tau}{4 N f_2} \cdot e^{\frac{R_0'' C_i^2 \tau}{8 N f_2}} d\tau \approx -\int_0^{\tau_{max}} \frac{R_0'' C_i^2 \tau}{4 N f_2} \cdot e^{\frac{R_0'' C_i^2 \tau}{8 N f_2}} d\tau \approx 1, \quad (7)$$

где: \hat{P}_{max} – интегральная оценка вероятности появления положительного выброса длительностью $\tau = \tau_0 \dots \tau_k = 0 \dots \tau_{max}$;

$-R_0''$ – коэффициент автокорреляции второй производной случайного процесса $\xi(t)$;

N – спектральная плотность мощности случайного процесса $\xi(t)$;

$f_{гр}$ – верхняя граничная частота.

Тогда с помощью (6) находим τ_{max} :

$$\tau_{max} \approx \frac{\sqrt{-96 \cdot \ln(10^{-5.5})}}{C_i f_2}. \quad (8)$$

Теперь, используя (8), (4) и (5), запишем выражение для максимального значения периода следования точек в реализации случайного процесса $\xi(t)$, которые являются зависимыми друг от друга с коэффициентом корреляции, величина которого является минимально возможной для данного уровня H_i :

$$T_{max} \approx \frac{1}{\Phi(-C_i)} \frac{\sqrt{-96 \cdot \ln(10^{-5.5})}}{C_i f_2} \approx \frac{1}{H_i} \frac{2}{2 - \operatorname{erf}\left(\frac{H_i}{\sqrt{2 N f_2}}\right)} \sqrt{\frac{-96 N \cdot \ln(10^{-5.5})}{f_2}}. \quad (9)$$

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО СПОСОБА В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОГО ЗАШУМЛЕНИЯ

Рассмотрим случай, когда величина соотношения сигнал / шум мала и проанализируем возможность работы алгоритма в этих условиях. Для этого выполним следующий эксперимент: в качестве полезного сигнала будем рассматривать аддитивную смесь трех синусоидальных сигналов, амплитуда, частота, фаза и начальное смещение которых заданы случайным образом в диапазоне 0...1. В качестве шума будем рассматривать сигнал белого шума, который вместе с полезным сигналом образует аддитивную смесь сигнал+шум, граничная частота и спектральная плотность мощности которого известны заранее и равны $f_{гр}$ и N соответственно, а величину дисперсии D будем рассчитывать для каждого анализируемого случая с помощью стандартных математических функций. Значение уровня H_i примем равным 2,5 В. Далее с помощью (9) выполним расчет величины T_{max} и определим значения точек в исходной смеси, соответствующие найденному периоду повторения при условии выбора в качестве стартовой точки момент времени $t_0 = 0$. С целью визуализации

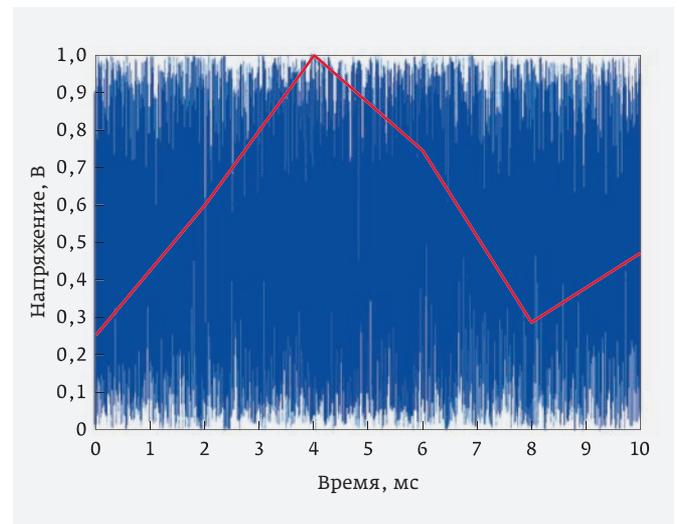


Рис. 2. Исходный шум (синий график) и выделенный шум (красный график)

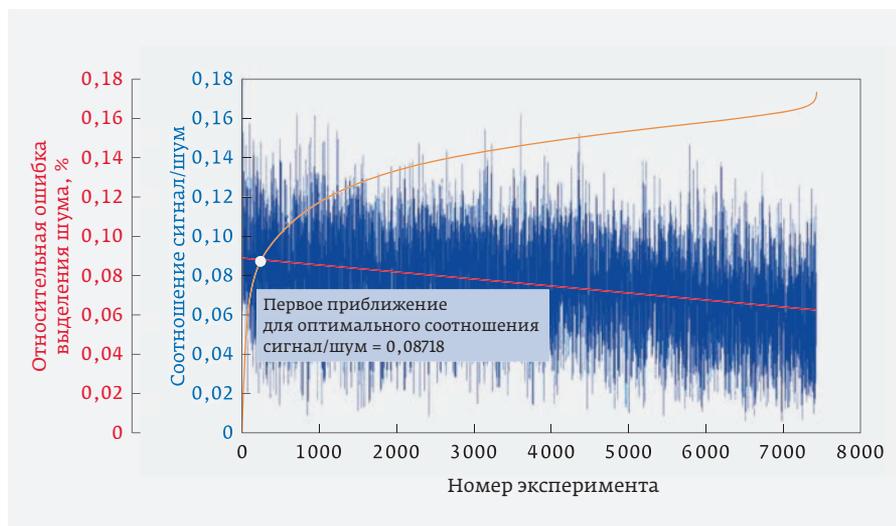


Рис. 3. Определение оптимального значения сигнал/шум

зации результата полученный «слепок» шума наложим поверх исходной смеси сигнал+шум (рис. 2).

Далее в качестве критерия для оценки эффективности работы способа будем рассматривать величину относительной разницы между значениями сигнал/шум, сформированного в начале работы и рассчитанного в конце, согласно (9). Будем указанную величину называть ошибкой выделения.

Проведем серию экспериментов, аналогичных тому, что был описан выше, для каждого из которых определяем фактически полученное соотношение сигнал/шум и соответствующее ему значе-

ние относительной ошибки выделения. до тех пор, пока значение ошибки выделения не попадет в интервал 0...1%. Это позволит нам накопить некоторое количество значений СКО сигнал/шум, которое будет наиболее близко к найденному ранее оптимальному значению.

Описанный выше эксперимент длился 30,3 суток и в результате было накоплено 394 значений соотношений СКО сигнал/шум, удовлетворяющих указанному условию. Но, поскольку большая часть результирующих значений многократно повторяется, то она не может быть рассмотрена в качестве полезной информации. Поэтому, все полученные

точки были собраны для удобства в виде массива, затем проанализированы на предмет повторяемости. Конечный результат представлен на рис. 4, исходя из которого можно сделать следующий вывод: если соотношение СКО сигнал/шум будет находиться в пределах 0,035...0,124, то ошибка выделения шума не будет превышать 1%.

Проанализируем СКО полезного сигнала и сформируем шум, СКО которого будет больше, чем СКО полезного сигнала в определенное число раз: если следовать логике результатов, представленных на рис. 4, то СКО шума должно быть больше СКО полезного сигнала в 8...28 раз (что соответствует крайним точкам

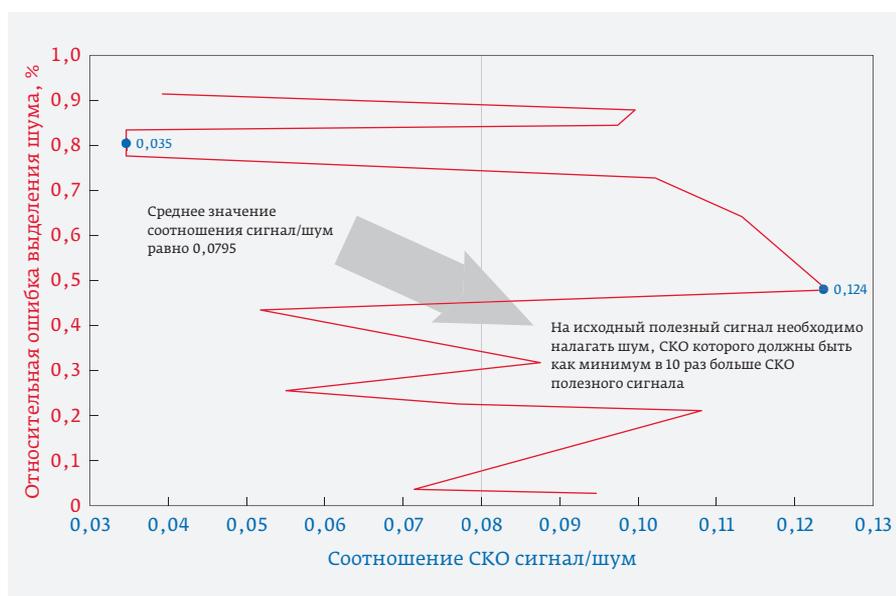


Рис. 4. Определение диапазона оптимальных значений сигнал/шум



Рис. 5. Определение оптимального значения соотношения шум/сигнал

графика – 0,124...0,035). И далее будем изменять указанную величину в пределах 7...25, для каждого значения выполним по 1000 проходов и сохраним те же результаты, что и в прошлом случае. Далее для удобства будем использовать соотношение шум/сигнал, а не сигнал/шум.

Описанный выше эксперимент длился 8,2 суток, но результатов с максимальным значением эффективности получилось совсем немного, всего 4, у каждого из которых было проведено всего 4...9 экспериментов. Но для установления предварительной

зависимости такого количества вполне достаточно. В результате было установлено, что при соотношении СКО шум/сигнал, равном 15, достигалась эффективность работы, равная 34,79% (рис. 5).

Далее выполним эксперименты со значением СКО шум/сигнал, равным 14...16, поскольку, как было показано выше, наиболее вероятным успешным значением данного коэффициента является 15. Описанный выше эксперимент длился примерно 23 суток, и в результате было выполнено 903 успешных эксперимента. Далее для каждого эксперимента определялась эффективность работы по двум критериям: уда-

ление случайной постоянной составляющей и восстановление формы полезного сигнала. Это было связано с тем, что при полном удалении случайной постоянной составляющей искажалась форма полезного сигнала, поэтому, очевидно, следует найти баланс в эффективности по обоим критериям сразу – пусть будет удалено не 100% случайной постоянной составляющей, а меньше, но, при этом, форма полезного сигнала искажена не будет. С этой целью для каждого эксперимента вычислялась разница между исходной смесью и полезным

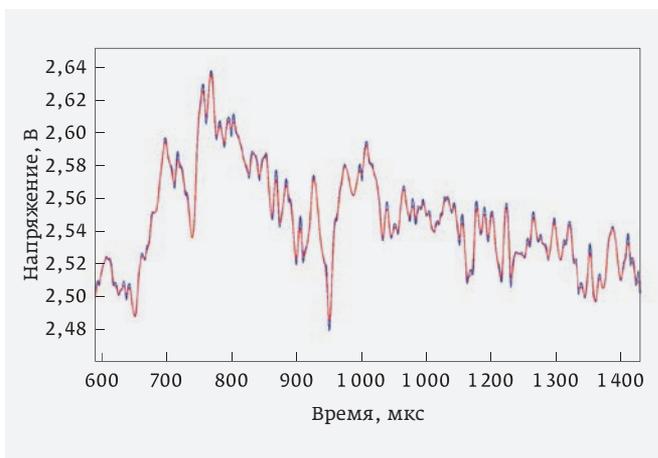


Рис. 6. Пример результата выделения полезного сигнала МЭМС-акселерометра для статического значения ускорения: синий график – исходный сигнал, красный график – результат работы алгоритма

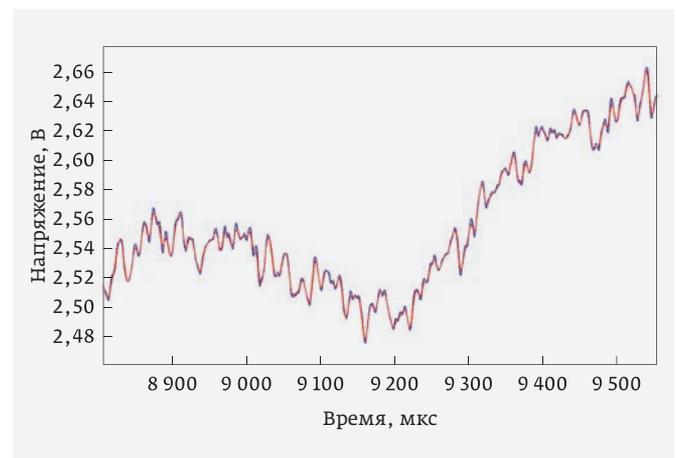


Рис. 7. Пример результата выделения полезного сигнала МЭМС-акселерометра для статического значения ускорения: синий график – исходный сигнал, красный график – результат работы алгоритма

сигналом и разницей между результатом работы алгоритма и полезным сигналом. Таким образом, мы получали шум в смеси до и после работы алгоритма. Затем вычислялось среднее значение и СКО полученного в обоих случаях шума и находилась разница между ними, то есть получили два массива данных: первый – эффективность по критерию случайной постоянной составляющей и второй – по критерию восстановления формы полезного сигнала. После этого полученные два массива данных были отсортированы по возрастанию. Пользуясь индексами отсортированных массивов, определялись соответствующие значения СКО полезного сигнала.

Согласно полученным данным можно сделать вывод о том, что оптимальным значением СКО полезного сигнала в описанных во введении условиях применительно к приборам с динамическим диапазоном, равным 5В, при котором будет отсутствовать искажение формы и одновременно будет уменьшаться среднее значение шума (т.е. повышаться соотношение сигнал/шум), является диапазон 0...0,6В.

Теперь опробуем данный способ на реальном объекте, в качестве которого будем использовать преобразователь линейного ускорения (МЭМС-акселерометр). Будем использовать МЭМС-акселерометр с диапазоном измеряемых ускорений, равным $\pm 5g$. Для эксперимента запишем его выходной сигнал с частотой дискретизации, равной 10 кГц, при случайном изменении приложенного ускорения в диапазоне $\pm 1g$. Затем в качестве исходного сигнала возьмем фрагменты записи для разных моментов времени и обрабатываем эти фрагменты согласно предложенному способу. Результаты представлены на рис. 6, 7. Исходя из представленных результатов, можно сделать вывод об успешном подавлении случайной шумовой составляющей в исходном сигнале, который представляет собой результат эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет удалять случайную постоянную составляющую из исходной аддитивной смеси полезного сигнала и шума, подчиняющейся нормальному закону распределения [12, 13].

КОНФИЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2638919 Российская Федерация, МПК G 01 P 15/125, 2638 919 C1. Электронная система компенсационного акселерометра / Шалимов А. С., Тимошенков С. П., Анчутин С. А.: заявитель и патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники». – № 2016144765; заявл. 16.11.2016; опубл. 18.12.2017, Бюл. № 35. – 10 с.: ил.
2. **Тимошенков С. П., Шалимов А. С., Головинский М. С., Калугин В. В., Коробова Н. Е., Тимошенков А. С., Анчутин С. А.** Маршрут проектирования МЭМС-акселерометра, оптимизированного по выбранным параметрам для обеспечения возможности самокалибровки // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 12. С. 707-713.
3. **Лифшиц М. А.** Случайные процессы – от теории к практике [Электронный ресурс]: учеб. пособие. – Электрон. дан. – СПб: Лань, 2016. 320 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/71720>. – Загл. с экрана.
4. **Бородин А. Н.** Случайные процессы [Электронный ресурс]: учеб. пособие. – Электрон. дан. – СПб: Лань, 2013. 640 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/12935>. – Загл. с экрана.
5. **Хрущева И. В., Щербаков В. И., Леванова Д. С.** Основы математической статистики и теории случайных процессов [Электронный ресурс]: учеб. пособие. – Электрон. дан. – СПб: Лань, 2009. 336 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/426>. – Загл. с экрана.
6. **Шахтарин Б. И., Тихонов В. И., Сизых В. В.** Случайные процессы. Примеры и задачи. – Т. 5. Оценка сигналов, их параметров и спектров. Основы теории информации [Электронный ресурс]: учеб. пособие. – Электрон. дан. – М.: Горячая линия-Телеком, 2012. 400 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/5203>. – Загл. с экрана.
7. Пат. 2539573 Российская Федерация, МПК H 04 B1/10, 2539 573 C1. Способ адаптивного и согласованного подавления флуктуационных шумов и сосредоточенных помех и устройство для его реализации / Иевлев С. В., Соловьев Ю. А., Сергиенко А. И., Ситников А. С., Тютюнников М. А.: заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Концерн «Созвездие». – № 2013144542/07; заявл. 03.10.2013; опубл. 20.01.2015, Бюл. № 2. – 22 с.: ил.

8. Пат. 2480897 Российская Федерация, МПК Н 03 Н 9/00, Н 04 В1/10, 2480 897 С1. Способ выделения полезного сигнала из шумов – «Метод зеркальных шумовых образов» и устройство для его осуществления / Чернов Е. И., Соболев Н. Е.: заявитель и патентообладатель Чернов Е. И. – № 2012117850/08; заявл. 27.04.2012; опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12. – 5 с.: ил.
9. **Tovkach I.O., Zhuk S.Ya.** Adaptive filtration of radio source movement parameters with complex use of sensor network data based on TDOA and RSS methods // *Radioelectronics and Communications Systems*. 2017. Vol. 60. № 12. PP. 528–537.
10. **Kogan M.M.** Optimal estimation and filtration under unknown covariances of random factors // *Automation and remote control*. 2014. Vol. 75. № 11. PP. 86–109.
11. **Bors Dorota, Walczak Stanislaw.** Application of 2D systems to investigation of a process of gas filtration / Dorota Bors, Stanislaw Walczak // *Multidim Syst Sign Process*. 2012. Vol. 23. Issues 1–2. PP. 119–130.
12. Заявка 2017108287 Российская Федерация, МПК Н 03 Н 9/46. Способ выделения полезной составляющей из входного сигнала, содержащего полезную составляющую и шум / Шалимов А. С.: заявитель Шалимов А. С. – № 2017108287; опубл. 22.06.2017, Бюл. № 18. – 7 с.: ил.
13. Заявка 2017133293 Российская Федерация, МПК Н 04 В 1/10. Способ выделения полезной составляющей из входного сигнала, содержащего полезную составляющую и шум / Шалимов А. С.: заявитель Шалимов А. С. – № 2017133293; опубл. 14.11.2017, Бюл. № 32. – 12 с.: ил.

ФИЗИЧЕСКОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ МНОГОФАЗНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МЕТАЛЛ-УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА БАЗЕ КАРБИДОВ

► Ф. И. Высикайло¹, В. С. Митин², А. А. Якушкин³, В. В. Беляев^{1, 4}

¹ МГОУ, ²ОАО «ВНИИНМ им. А. А. Бочвара», ³АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», ⁴РУДН

Решена фундаментальная научная задача для микро- и нанoeлектроники – разработаны методы создания и исследования свойств физически легированных материалов с пространственно-неоднородной структурой на микро- и нанометровом масштабе. Разработаны наноструктурированные материалы с повышенной прочностью и износостойкостью, неоднородные на наноуровне, физически легированные наноструктурами – квантовыми ловушками для свободных электронов. Решение этой задачи позволит создавать новые наноструктурированные материалы, исследовать с высокой точностью их различные физические параметры, конструировать, изготавливать и эксплуатировать устройства с новыми техническими и функциональными возможностями, в том числе и для атомной промышленности. Разработан метод многофазных наноструктурных композиционных покрытий (на основе карбидов переходных металлов) с высокой твердостью 30 ГПа, низким коэффициентом трения до сухого 0,13–0,16, с высокой термостойкостью до 3000 °С и термической стабильностью кристаллического состояния более 1200 °С. Управление нанокристаллической структурой и свойствами карбидных композитных многофазных покрытий осуществляется путем изменения концентрации свободного углерода в них для образования в материале наногرافита аморфной фазы. Установлено, что присутствие наногرافита в композите значительно улучшает ударную вязкость и расширяет диапазон возможных применений таких композитов по сравнению с чистыми карбидами.

PHYSICAL DOPING FOR CONTROL OF NANOCRYSTALLINE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MULTIPHASE COMPOSITE METAL-CARBON COATINGS ON THE BASIS OF TRANSITION METAL CARBIDES

P. I. Vysikaylo¹, V. S. Mitin², A. A. Yakushkin³, V. V. Belyaev^{1, 4}

¹MRSU, ²JSC VNIINM named after A. A. Bochvar, ³SC SRC RF TRINITI, ⁴RUDN University
The fundamental scientific problem for micro- and nanoelectronics has been solved – methods for creating and investigating properties of physically doped materials with spatially

inhomogeneous structure at the micro- and nanometer scale have been developed. Nanostructured materials, including those with increased strength and wear resistance, are inhomogeneous at the nanolevel, physically doped with nanostructures-quantum traps for free electrons. The solution of this problem will allow creating new nanostructured materials, investigating their various physical parameters with high accuracy, designing, manufacturing and operating devices with new technical and functional capabilities, including for the nuclear industry. The method for multiphase nanostructured composite coatings (based on carbides of transition metals) with high hardness of 30 GPa, a low coefficient of friction to dry 0,13–0,16, with high heat resistance up to 3000 °C and thermal stability in the nanocrystalline state over 1200 °C is developed. Management nanocrystalline structure and properties of carbide composite multiphase coatings is performed by varying the concentration of free carbon in them to form in the material of the amorphous phase nanographite. It is established, the presence nanographite in the composite significantly improves the impact strength and extends the range of possible applications, compared with pure carbides.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к наноструктурированным углеродом материалам проявляется в ряде современных экспериментальных работ, выполненных в России и за рубежом [1–8]. Это связано с уникальными свойствами, возникающими при наноструктурировании композитных материалов структурами из углерода. Например, они в десятки раз становятся более прочными, пластичными, повышаются люминесцентные характеристики и т. д. В настоящее время в научной литературе отсутствуют четкие представления о механизмах, приводящих к появлению уникальных свойств у таких наноструктурированных композитов, нет описания комплекса свойств, ответственных за их технические характеристики. Механизм физического легирования и процессы, ответственные за существенное изменение свойств нанокompозитных материалов при их физическом легировании структурами из углерода выявлен впервые в мире авторами данной работы [6–9]. В данной работе этот метод используется и исследуется с целью существенно модифицировать свойства наноструктурированных композитов из карбидов переходных металлов структурами из углерода, обладающих большим сродством к электронам и поэтому являющихся эффективными ловушками для свободных электронов физически легируемых материалов.

Свободный углерод встречается как в природе, так и во многих изделиях микро- и наноэлектроники в различных аллотропных формах. Углерод является единственным элементом в периодической таблице, который имеет многообразие аллотропных форм. Как известно, имеются стабильные изомеры с 1 (карбины – линейные структуры), 2 (графены – двумерные структуры) или 3 (алмазы – трёхмерные струк-

туры) измерениями. Из-за возможности различных связей электронных состояний атомов углерода в молекулах (с различной топологией связей атомов), формирующих топологически разные, но взаимно совместимые привязки, может приводить к богатой гамме электрических свойств, связанных с конкретной геометрией наноструктур. Схематично, наноструктуры углерода могут функционировать в качестве проводника в цепи sp^1 – карбины – и sp^2 – планарной структуры графена и графита, или как широкозонный диэлектрик с sp^3 связями – например, алмаз и др. Происхождение этих свойств может быть отнесено непосредственно к типу гибридизации: sp^1 , sp^2 или sp^3 . Первые два имеют потенциал, чтобы сформировать связи, которые являются электропроводящими, а sp^3 обладает свойствами изолятора и уникальной теплопроводностью в два раза выше, чем у меди. Эти свойства позволяют предполагать, что наноструктурированные композитные материалы имеют мощный потенциал для их применения в транзисторах и других электронных компонентах [10].

В рамках данной работы созданы и исследованы свойства физически легированных наноструктурами из углерода нанокристаллы карбидов переходных металлов. Интерес к карбидам и оксидам самый разнообразный до их каталитических и электрокаталитических применений в различных приборах и технологиях [<https://www.science.gov/topicpages/t/tungsten+carbides+wc.html>] и даже в ТВЭЛ-ах в атомной промышленности. Свойства карбидов существенно определяются размерами зерен карбидов. Так в работах за 2015 год Благовещенским, Сахаровым; Болдиным; Нохриным; Исаевой; Шотиным; Лопатиным, Смирновой получены образцы высокой плотности сверхмелкозернистого карбида воль-

фрама с высокой твердостью (до 31–34 ГПа) и повышенной вязкостью разрушения с использованием технологии электроимпульсного плазменного спекания. Ими подробно исследовано влияние начального размера наночастиц, полученного плазмохимическим синтезом на плотность, структурные параметры и механические свойства карбида вольфрама [<https://www.science.gov/topicpages/t/tungsten+carbides+wc.html#>].

В данной работе нами для сохранения мелкозернистости карбидов, при долгосрочной эксплуатации приборов на их базе, предложен оригинальный метод физического легирования нанокристаллов карбидов структурами из аллотропных форм углерода, являющихся ловушками для свободных электронов. Структуры из углерода, поляризуясь, вытягивают на себя часть свободных электронов композита. Сами заряжаются отрицательно, а отдавшие свободные электроны нанокристаллы карбидов, заряжаются положительным зарядом. По этой причине положительно заряженные нанокристаллы карбидов не рекристаллизуются со временем. Физически легированные материалы создавались при использовании технологии высокоскоростного ионно-плазменного магнетронного распыления (ВИПМР) [11, 12], то есть для нанесения карбидных и других углеродосодержащих композитов не применялись взрывоопасные газы и их смеси с водородом, в отличие от других технологий, используемых при исследовании и производстве покрытий, физически легированных структурами из углерода.

Опыт работ по физическому легированию материалов различной природы, предложенному впервые теоретически в [9], у авторов работы уже имелся на примере физического легирования фуллеренами термоэлектриков [7] и легирования меди структурами углерода [6]. В этих работах [6, 7, 9, 13–17] впервые авторами работы исследованы аналитически два квантово-размерных эффекта, связанных с 10 поляризационными эффектами, обусловленными захватом свободных электронов в наноструктуры из аллотропных форм углерода.

При химическом легировании кристалла происходит внедрение инородного атома в кристаллическую решетку. Это возмущает решетку и приводит к волновым колебаниям на наноуровне относительной диэлектрической проницаемости легируемого материала.

При физическом легировании наноструктурами с большим сродством к электронам происходит вытягивание части электронов из кристалла в леги-

рующую наноструктуру. Это приводит к кулоновскому взаимодействию положительно заряженного нанокристалла с отрицательно заряженной легирующей наноструктурой, что проявляется, например, в изменении люминесцентных характеристик нанокристаллов, кулоновскому упрочнению материалов, приводит к исключению рекристаллизации так легируемого наноструктурированного материала и проявлению других квантово-размерных эффектов. Создание, исследование свойств и методика получения наноструктурированных композиционных многофазных покрытий, физически легированных наноструктурированных материалов в данной работе нами проведено на примере физического легирования нанокристаллов карбидов переходных металлов структурами углерода. Это позволило получить прочные (кулоновски обжатые) материалы с высокой микротвердостью до 30 ГПа, низким коэффициентом сухого трения до 0,13–0,16, с высокой термостойкостью до 3000 °С и термостабильностью в нанокристаллическом состоянии более 1200 °С.

Для создания современной техники 4+ и 5-го поколений весьма актуальным является применение высокотемпературных материалов на основе химических соединений переходных металлов IV–VI групп периодической системы элементов с азотом, бором, кремнием и углеродом.

Среди этих соединений особое место занимают карбиды, обладающие высокой температурой плавления от 2580 °С – полукарбид молибдена до 3880 °С – карбид тантала, твердостью до 31 ГПа, износостойкостью, коррозионной устойчивостью, стойкостью по отношению к расплавленным металлам, малой упругостью паров и малой скоростью испарения.

Наряду с этим они обладают также и специфическими электрическими и тепловыми свойствами и могут быть использованы в качестве материалов нагревательных элементов высокотемпературных печей, высокотемпературных термопар и катодов термоэлектронных устройств [18], ТВЭЛов при добавлении урана и т. д.

Одним из базовых технологических направлений является получение покрытий из карбидов и нанесение их на рабочую поверхность инструментов деталей машин. Однако в чистом виде карбиды, как и оксиды, имеют повышенную хрупкость. Для повышения их пластических свойств в состав карбидов вводят металлическую фазу и измельчают зерно, затем их спекают.

В качестве современного инструмента для нанесения покрытий из карбидов без использования реак-

ционных газов ацетилен, метана, пропана и др. (процесс взрывоопасный) применяется метод высокоскоростного ионно-плазменного магнетронного распыления – ВИПМП [6, 11, 12]. Этот метод позволяет осуществлять при определенных условиях (изменение плотности мощности плазменного разряда в диапазоне значений от 40 до 125 Вт/см²) совместное распыление из мозаичных мишеней различных композиций материалов, например: металл-графит, металл-карбид-графит, карбид-металл, карбит-графит и в широком диапазоне варьировать как состав (соотношением площадей занимаемых металлом, карбидом и графитом), так и дисперсностью кристаллической структуры изменением мощности разряда. Скорости нанесения покрытий из карбидов методом ВИПМП при таких плотностях мощности распыления материалов (металла и графита) составляет 0,1 до 0,7 мкм / мин, что практически на порядок больше, чем при обычном магнетронном распылении (MRS-PVD) и вакуумно-дуговым распылении (ARC-PVD).

Этот метод позволяет практически перейти к иному механизму взаимодействия углерода и металлов при их распылении ионной бомбардировкой. Если при использовании газов образование карбидов происходит непосредственно на мишени и затем идет молекулярный перенос карбидов через распыление на подложку, то при ВИПМП из мозаичных мишеней идет совместное распыление атомов углерода и металла и взаимодействие между ними, как в потоке пара, так и на подложке. В этом случае мы можем получать не только карбиды, но и другие фазы, включая наноуглеродные и наноструктуры металла. Подтверждением этому является процесс нанесения композиционного покрытия металл-углерод, где металл не взаимодействует с углеродом, например: медь-углерод. Покрытие в этом случае имеет двухфазный состав, состоящий из наноструктур металла и фазы нанографита [6, 19].

Работа направлена на решение фундаментальной научной задачи для атомной промышленности, нанoeлектроники и оптоэлектроники – разработка оригинальных методов создания и исследования свойств физически легированных материалов с пространственно неоднородной структурой различного типа на микро- и нанометровом масштабе. Для этого нами разработаны новые научные основы формирования и исследования, неоднородных на наноуровне кристаллов (с кристаллической и жидкокристаллической структурой) различных нанокомпозитов физически легированных наноструктурами с большим сродством к электронам, что

обуславливает разделение заряда на размерах физически легируемого нанокристалла (ядра) и легирующей его наноструктуры (оболочки). Решение этой задачи позволит создавать новые наноструктурированные материалы на новых принципах, исследовать с высокой точностью их различные физические параметры, конструировать, изготавливать и эксплуатировать устройства с новыми техническими и функциональными возможностями на основе наноструктурированных материалов, в том числе с повышенной прочностью и износостойкостью для ТВЭЛов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Нанесение покрытий из карбидов проводилось в вакуумной установке типа ВУ-ВСМ 600/4 (МЭШ – 60) в комплект которой входили: ионный источник для активации поверхности напыляемых образцов, нагреватель до температуры 450–500 °С; магнетроны для ВИПМП с мозаичными мишенями, планетарная карусель с подложками-образцами. Состав мозаичных мишеней и режимы нанесения покрытий представлены в табл. 1.

Схема процесса нанесения покрытий состояла из следующих основных операций: активация поверхности образцов ионной бомбардировкой ионами Ar, нагрев поверхности образцов до температуры 450–500 °С; нанесение слоя покрытия заданной толщины по режиму ВИПМП; охлаждение и тестирование толщин нанесенного слоя покрытия по методике «шар-кратер» на приборе «BC-2» фирмы Teer Coating Ltd (TCL).

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

- Адгезию покрытия к подложке (качественную оценку) проводили по методике глубокого вдавливания индентора (алмазная пирамидка) на твердомере Виккерса типа HVS-50 при нагрузке на индентор 5–8 кг (50–80 Н) и склерометрическим методом (скрайбирование или царапание) 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 Ø 15–20 мм толщиной до 5 мм и пластины 15×20×1,5 мм из нержавеющей стали с шлифованной поверхностью (типа металлографического шлифа).
- Микротвердость покрытия исследовали металлографическим методом. Для измерений использовали микротвердомер типа HVS-1000 с испытательным усилием на индентор 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 \varnothing 20–30 мм из нержавеющей стали, на поверхность которых было нанесено покрытие. В качестве контртела использовались шарики \varnothing 5 мм из твердого сплава ВК-8 и шарикоподшипниковой стали ШХ-15. Скорость движения столика с образцом составляла 4 мм/с, нагрузка на индентор варьировалась в диапазоне 0,5–10 кг (5–100 Н).
 - Фазовый состав получаемых покрытий анализировали на рентгеновском дифрактометре Rigaku D/max-RC и ДРОН-3М, оснащенном источником излучения мощностью 12 кВт с вращающимся анодом (графитный кристалл-анализатор, CuK_α – излучение и CoK_α – излучение). На ДРОН-3М использовали излучение CuK_β , дающее при съемках на малых углах синглет. Для съемки дифрактограмм использовали классическую схему фокусировки по Брэггу-Брентано.
 - Химический (элементный) состав покрытия, структуру поверхности и в изломе 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 $10 \times 15 \times 1,5$ мм из нержавеющей стали и меди.
 - Для исследования спектров комбинационного рассеяния света (КРС) применялась установка с микроскопической приставкой на базе спектрометра TRIAX 552 (Jobin Yvon) и детектора CCD Spec-10, 2KBUV (2048 \times 512) (Princeton Instruments), с системой отрезающих фильтров для подавления возбуждающих лазерных линий. Источником возбуждающего света служили лазеры STABILITE2017, BeamLok®

2065–7S компании Spectra-Physics и удвоитель WaveTrain.

Спектральный диапазон 200–1100 нм
 Спектральное разрешение 3 см^{-1}
 Лазерное возбуждение спектра 514 нм
 Пространственное разрешение 1–2 мкм.
 Мощность возбуждающего КРС лазерного излучения не превышала 1 мВт.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные в экспериментах результаты сведены нами в табл. 1 и 2.

На рис. 1–5 представлены спектры КРС композитных покрытий.

Спектры КРС композитных покрытий (рис. 1–5) можно разбить на две части – линии в области до 1000 см^{-1} (карбиды, оксиды) и линии в области 1100 – 1600 см^{-1} (графит).

Для монокристаллического графита характерна линия в области 1580 см^{-1} , связанная с колебаниями атомов углерода (E_{2g}) в шестичленных циклах в плоскости графита – так называемая G-линия. При структурных нарушениях кристаллической решетки графита начинает появляться линия (A_{1g}) в области 1355 см^{-1} – D-линия [20–22], запрещенная по правилам отбора в бездефектном кристалле графита. Наличие D-линии характерно для поликристаллического графита, всех видов аморфного графита и нанокристаллических графитовых пленок [23].

В спектре образцов с совместным графит-молибденовым напылением (рис. 1) вместе с линиями разупорядоченного графита (1350 и 1580 см^{-1}) присутствуют и линии оксидов молибдена (206 , 370 , 455 , 870 и 960 см^{-1}). Линия 960 см^{-1} приписывается колебаниям концевых групп Mo-O в полимерных системах оксида молибдена. Линия в области 870 см^{-1} описывается мостиковыми колебаниями O-Mo-O в Mo_4O_{11} и колебаниями концевых групп Mo-O в MoO_{3-x} . Линия в области 455 см^{-1} принадлежит валентным и деформационным колебаниям связи O-Mo-O, а линия в области 370 см^{-1} принадлежит «ножничным» колебаниям O-Mo-O в оксидах молибдена состава MoO_{3-x} . Линия в области 206 см^{-1} приписывается колебаниям симметрии B_{2g} в MoO_2 и Mo_4O_{11} .

Из-за нарушения стехиометрии оксидов, а именно – уменьшение соотношения металл/кислород в оксидах приводит к увеличению количества кислородных вакансий, что приводит к нарушению трансляционной симметрии и сдвигу атомов молибдена в концевых группах Mo-O. То есть – к искаже-

Таблица 1. Покрытия, полученные из мозаичных и компактных мишеней

№	Шифр катода	Состав по данным рентгеновской дифрактометрии	Характеристики			
			материал подложки	плотность мощности, Вт/см ²	ток разряда, А	толщина покрытия, мкм
Покрытия из мозаичных мишеней						
1	6МоГ	70% Мо 30% С	Нерж. сталь	105	4,2	4,0
			Медь	125	5,0	6,0
2	12ГМо	70% С 30% Мо	Медь	125	5,0	6,0
3	11NbГ	70% Nb 30% С	Медь	105	4,2	4,0
4	10GV	50% V 50% С	Никель	105	4,2	4,0
5	4ZrГ	50% Zr 50% С	Медь	ПО	4,4	-5,0
6	5ZrГ	80% Zr 20% С	Нерж. сталь	105	4,2	-4,0
7	13 Г Та	50% С 50% Та	Медь	37	1,5	-3,0
			Медь	74	3,0	-4,0
			Медь	105	4,2	-4,0
8	9 Г Нерж. сталь	80% нерж. сталь	Медь	105	4,2	-4,0
		20% С				
		Ст. ОХ18Н10Т				
9	14CrMo	80% С 10% Cr 10% Мо	Медь	120	2,5	-3,0
Покрытия из компактных мишеней						
10	TaC стандарт	100%	Сталь Р6М5	75	3,0	6,0
11	TaC Категория 5430 дезагрегация + УДС	80% TaC 15% Ta ₂ C 5% Та	Никель	125	5,0	8,0
12	TaC Категория 1830 дезагрегация	100% Ta ₂ C	Нерж. сталь	125	5,0	8,0

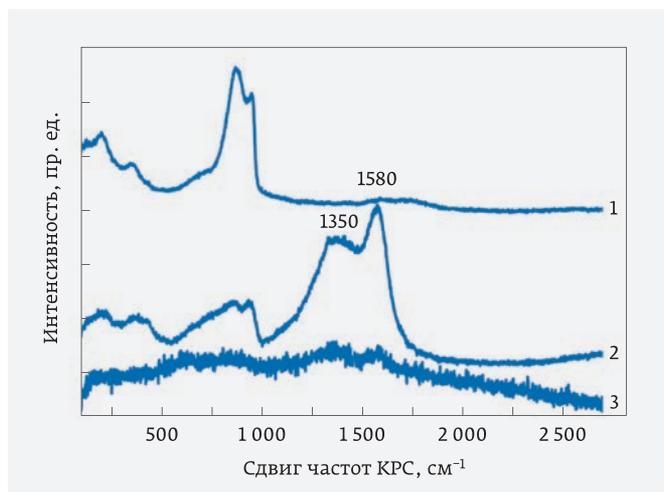


Рис. 1. Спектр КРС образцов напыленных композитных покрытий при возбуждении лазером с длиной волны 514 нм: 1 – Mo-C (70 : 30). Материал подложки – нержавеющая сталь. 2 – Mo-C (30 : 70). Материал подложки – медь. 3 – Cr-Mo-C (80% C : 10% Cr : 10% Mo). Материал подложки – медь

нию кристаллической решетки оксидов, за счет чего происходит уширение линий КРС [24–28].

С увеличением процентного содержания графита в композите (менялся состав мишени) увеличивается интенсивность линий 1350 и 1380 см^{-1} в покрытиях, что говорит о увеличении доли аморфного

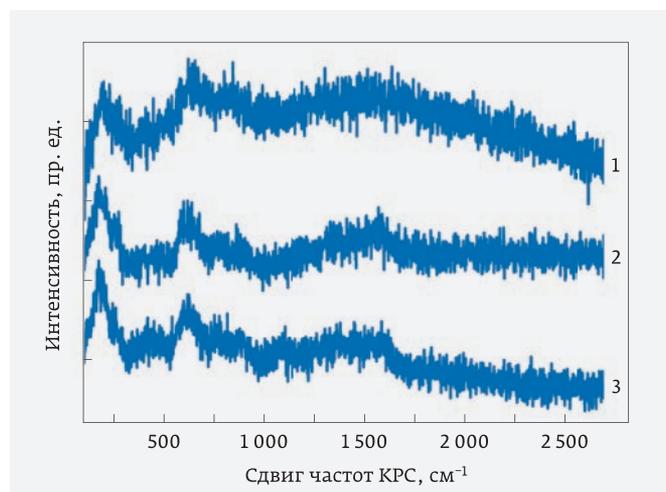


Рис. 2. Спектр КРС образцов № 7 Мишень: 50% Ta + 50% C (см. табл. 1) с композитным покрытием из карбида тантала на подложке из меди при возбуждении лазером с длиной волны 514 нм: 1 – плотность мощности разряда – 37 Вт / см^2 ; 2 – 74 Вт / см^2 ; 3 – 105 Вт / см^2

углерода в них. На это указывает и рентгеноструктурный анализ. Введение в систему хрома приводит к резкому уменьшению интенсивности линий оксидов молибдена. Иными словами, присутствие хрома подавляет процессы окисления молибдена.

В спектрах КРС образцов серии № 7 (табл. 1), напыление в которых происходило при различных условиях, но при одинаковом содержании тантала в мишени, присутствуют линии графита (1350 и 1580 см^{-1}) и линии в области 190 и 630 см^{-1} – карбид тантала (рис. 2). С увеличением тока разряда и плотности мощности положение и число линий остается прежним, но увеличивается люминесцентный фон, связанный со структурными дефектами (оборванные связи и прочее) (спектр 3 на рис. 2). Это позволяет сделать вывод, что увеличение плотности мощности ведет к увеличению скорости роста пленки, но при этом увеличивается и ее дефектность.

В образцах совместного напыления углерода с ванадием, ниобием или нержавеющей сталью в спектрах КРС присутствуют линии разупорядоченного графита (1350 и 1580 см^{-1}) и карбидов (линии в области 200 и 600 см^{-1}) (рис. 3).

Спектры КРС напыленных композитных покрытий из компактных мишеней TaC (рис. 4) представляют собой наложение линий разупорядоченного графита (1350 и 1580 см^{-1}) и карбида тантала (140

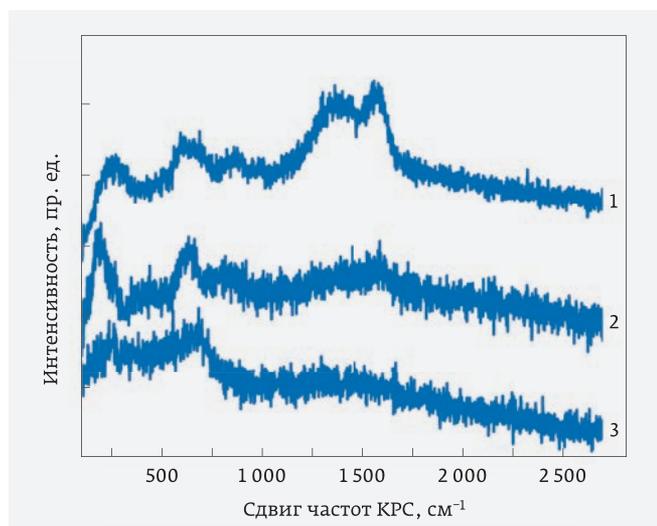


Рис. 3. Спектр КРС образцов напыленных композитных покрытий при возбуждении лазером с длиной волны 514 нм: 1 – V-C (50 : 50). Материал подложки – никель. 2 – Nb-C (70 : 30). Материал подложки – медь. 3 – нержавеющая сталь – C (80 : 20). Материал подложки – медь

Таблица 2. Состав и свойства покрытий

№	Состав катода, соотношение Me : C, % по площади	Фазовый состав покрытия (рентген) – $w_t, \%$	Тип решетки, параметры, нм	Величина кристаллических блоков, нм	Химический состав – W, %	Микро-твердость, GPa
1	70 Mo + 30 C	Mo ₂ C-67,6±0,4 Mo – 32,4 ± 0,4 Ближе β Mo ₂ C Высоко-температурный	Гексагональная a = 0,301 c = 0,474	Текстура, 2,2–5,0	Mo(06)- 77,6 + 2,3 C(06)-2,3±0,3 Mo(Cв)- 38,6 ±2,3	13,00–30,00
2	50 Mo+50 C	MoC _{0,95–1,0} –95,6 ±0,4 C – 4,2	ГЦК α-MoC a = 0, 427	6,0–8,0	Mo(06) – 82,6 ± 2,6–84,5 ±0,6 C(06) –15 5 ±0,6–16,2±0,1 C(Cв)- 1,4± 1,0–5,6± 1,5	18,00–31,00
3	70 Nb + 30 C	Nb ₂ C	Гексагональная a = 0, 3115, c = 0,4948	Текстура, 1,0–3,0	Nb(06)-2,6±07 C(06)-6,07±1,5	23,00–29,00
4	50 Nb + 50 C	NbCO _{0,95–1,0}	ГЦК a = 0,443	Текстура, 2,0–5,0	Nb(06)- 84,3 ±3,0 C(06)- 6,45 ±08	18,90–23,00
5	50 V + 50 C	VC _{0,85–0,88}	ГЦК a = 0,4188	1,5–5,0	V(06)- 84,3 ±3,0 C(06)-95±0,5	13,00–26,00
6	50 Zr 50 C	ZrCO _{0,9–0,95} –96, 5 ±0,4	Кубическая Тип B-1 0,4683	5,0–6,0		18,50–30,00
7	80 Zr20 C	ZrC _{0,5–0,6} –76,5 ± 0,4 Zr- 23,5 ±0,4	Кубическая Тип B-1 0,4683	Текстура, 0–18		10,00–21,00
8	50 Ta + 50 C	TaCO _{0,97–0,1} –97,6 ± 0,4 C- 3,4 ±0,4	ГЦК a = 0, 444	6,0–8,0		15,30–27,00

и 670 см⁻¹). В образце, подвергшемся дезагрегации (спектр 2 на рис. 4) наблюдается повышение люминесцентного фона, что говорит об увеличении числа оборванных связей.

В спектре образцов с совместным графит-циркониевым напылением (рис. 5) присутствуют линии графита (1350 и 1580 см⁻¹) и линии в области (195, 258, 390, 530 и 580 см⁻¹) – карбида и нитрида циркония. Увеличение доли углерода в мишени приводит к увеличению его содержания в напыленной пленке – увеличиваются интенсивности линий графита (1350 и 1580 см⁻¹).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

В диапазоне используемых плотностей мощности от 37 Вт/см² до 125 Вт/см² (см. табл. 1) при совместном распылении металлов и графита на различных подложках осаждается гладкое серо-стального цвета покрытие. На полированных и стеклянных подложках покрытие имеет зеркальный блеск, характерный для покрытий из тугоплавких металлов. При увеличении содержания углерода цвет покрытия становится более темным и теряет блеск. Снижается коэффициент отражения света.

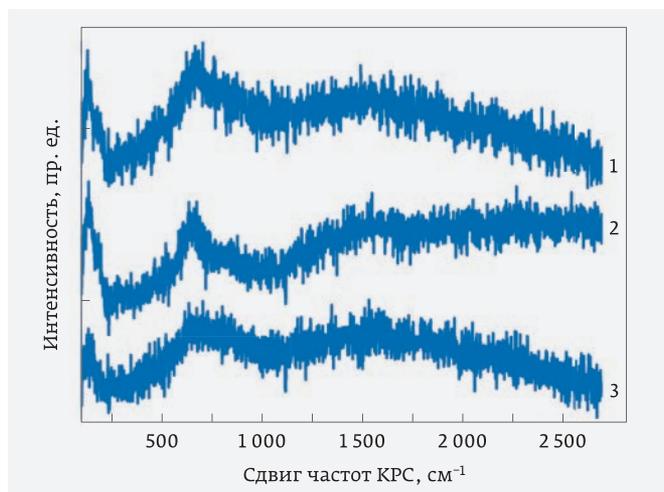


Рис. 4. Спектр КРС образцов напыленных композитных покрытий из компактных мишеней при возбуждении лазером с длиной волны 514 нм. 1 – TaC стандарт. Материал подложки – Сталь Р6М5. 2 – TaC Категория 5430 дезагрегация. Материал подложки – никель. 3 – TaC Категория 1830. Материал подложки – нержавеющая сталь

Все тугоплавкие металлы IVA-VIA групп периодической системы, которые были опробованы в работе, взаимодействуют с углеродом и образуют соединения – карбиды. Состав карбидов зависит от содержания металла и графита. При соотношении 50 : 50 (Me : C) ведет к образованию фазы $MeC_{0,95-0,98}$,

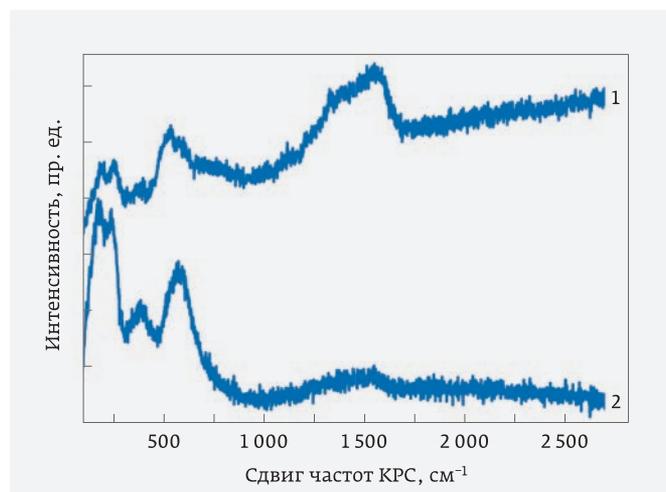


Рис. 5. Спектр КРС образцов напыленных композитных покрытий при возбуждении лазером с длиной волны 514 нм: 1 – Zr-C.(50 : 50). Материал подложки – медь. 2 – Zr-C (80 : 20). Материал подложки – нержавеющая сталь

близкой к стехиометрическому карбиду (см. табл. 2), соотношение 70 : 30 (Me : C) ведет к образованию Me_2C (полукарбида). Кроме того, в силу особенностей процесса ВИМПР, при распылении материалов на высокой плотности мощности формируется плотный поток пара и конденсация покрытия из этого потока может идти не по схеме твердое – пар – конденсат, а твердое – пересыщенный пар – аналог псевдожидкости – конденсат. Такая схема аналогична кристаллизации материала из жидкого состояния на холодной подложке (спиннингование) с большим градиентом температур. Учитывая, что карбиды тугоплавкие материалы с температурой плавления от 3530 °C (ZrC) до 3880 °C (TaC) и осаждение покрытия идет при температуре 480–500 °C, то перепад температуры может составлять 3000–3300 °C. В результате таких условий в покрытии конденсируется материал с ультрадисперсной – нанокристаллической структурой в большинстве своем с размером кристаллических блоков меньше 100 нм (см. табл. 2).

Образованию нанокристаллической структуры способствует наличие в материале покрытия несвязанного аморфного углерода (см. табл. 2 и рис. 1–3).

Наличие не прореагировавшего свободного несвязанного с металлом углерода, который образует аморфный графит, обусловлено, прежде всего, особенностями ВИМПР процесса. Высокоскоростное распыление разнородных материалов при установившейся одинаковой скорости распыления формирует достаточно плотный атомарный поток $10^{18}-10^{20}$ ат/см². При разной массе атомов и их активности (химической и электрической) при полете к подложке (поверхности конденсации) включается природный процесс их самосборки вначале в кластеры в паровой фазе, а затем в конгломераты (зародыши, образования) в твердой фазе на подложке. Углерод является самым тугоплавким материалом и его часть распыляется в виде наноструктур. В итоге формируются наноструктурированные углеродом покрытия, состоящие из ядра, в котором находится металл и карбид и углеродной наноболочки, в виде чешуек. В процессе покрытия углерод, не связанный с металлом и углерод в карбидах металлов IVA-VIA подгрупп периодической системы (переходные металлы) является физически легирующей добавкой или примесью внедрения. Формируется он по границам ультразерен карбидной фазы (рис. 3 и 6). Такая структура термически стабильна до 1000–1200 °C и выше до температуры рекристаллизации, равной 0,5 температуры плавления карбидов.

Варьируя составом получаемого многофазного композита можно изменять не только его структуру, но и свойства. Особый интерес представляет исследование термических свойств новых покрытий на базе карбидов. Покрытия из композитов карбидов имеют перспективу применения для режущего металлообрабатывающего и формообразующего инструментов, работающих на современных скоростных режимах резанья, прокатки и протяжки, повышающих производительность процесса обработки и существенно снижающих его себестоимость. Кроме того, эти покрытия имеют высокую совместимость с такими вязкими и пластичными металлами, как медь, алюминий и их сплавы, и могут быть использованы для защиты фильер и волок при протяжке проволок и для прокатных и калибровочных валков прокатных станков при получении листов и фольги из этих материалов.

В [6, 19] при исследовании медь-углеродных композитных покрытий было высказано предположение, что в настоящее время открываются неограниченные возможности по синтезу наноразмерных структур и, что самое главное, самосборки их в микро- и макро-структуры с уникальными свойствами и функциями. Это, поистине, революционный шаг, приводящий к радикальным изменениям в технологии производства новых материалов для различных отраслей промышленности. Углеродные структуры обладают большим сродством к электрону, а полые структуры типа фуллеренов, нанотрубок и иных замкнутых структур, ограниченных плоскостями графена, могут осуществлять захват резонансных электронов и тем модифицировать слоями объемного заряда свойства нанокompозитов, содержащих наноструктурированный углерод (рис. 6).

На примере измерения микротвердости конденсата видно (см. табл. 2), что с повышением содержания углерода возможно получение максимальной твердости, которая на 20–60% выше, чем для компактных материалов. Вместе с тем, эти твердые конденсаты имеют достаточно низкий коэффициент трения. Рост твердости материала возможно связан с рядом факторов:

- увеличением протяженности границ зерен при ультрадисперсной и нанокристаллической структурах;
- изменением состава углерода и ростом карбидной фазы;
- ростом внутренних напряжений (сжатие);
- разделением объемного заряда и кулоновским обжатием наноструктурированного материала (рис. 6).

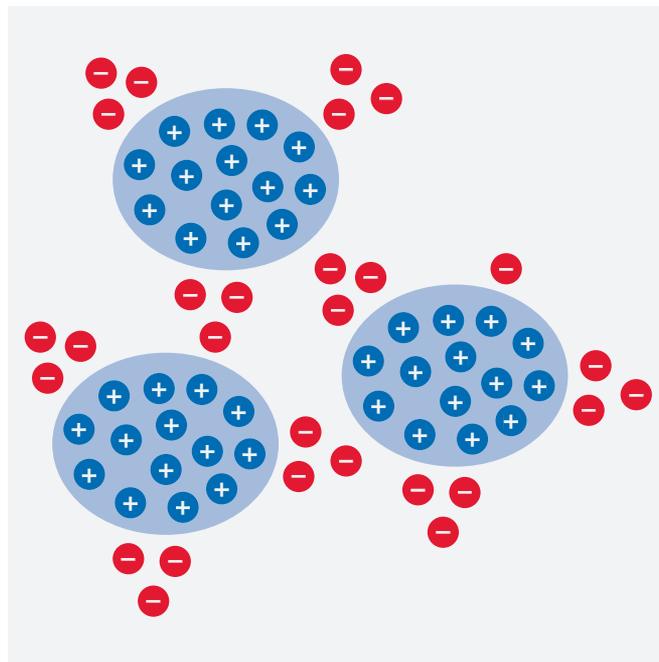


Рис. 6. Предполагаемая структуризация объемного заряда, обусловленная свойствами карбидов, металлов и углерода в их нанокompозите в целом соответствует разделению заряда в нанокompозите медь-углерод [6, 19]. Структуры с плюсиками – это нанокристаллы металла или карбида металла

Наличие свободного углерода в композите вне зависимости от состава делает этот материал устойчивым к износу.

В большинстве своем практически все карбидные композиты, полученные в нашей работе, обладали относительно низким коэффициентом трения, ниже 0,3. Среди этой группы аномально низкий коэффициент трения имели образцы серии Nb : C (50 : 50) – 0,13–0,16 при нагрузках на шарик Ø 5 мм из ВК-8 до 100 Н.

Наличие в композите свободного углерода снижает также износ изделий. Износостойкость карбидных покрытий, полученных в данной работе $< 10^{17} \text{ м}^3/\text{Нм}$.

ВЫВОДЫ

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

1. Композиционные покрытия на основе карбидов переходных металлов с наноструктурой были получены совместным распылением металла и графита из мозаичной мишени.

2. Высокоскоростной режим распыления материалов в диапазоне плотности мощности разряда от 37 до 125 Вт/см² позволяет варьировать фазовым составом, наноструктурой композита и его свойствами, включая механические: твердостью, износостойкостью и коэффициентом сухого трения.

3. Высокоскоростной режим распыления существенно влияет на динамику генерации парового потока и формирование в нём конденсата с образованием нескольких наноразмерных фаз: нанофаза на основе карбида, нанофаза на основе металла и нанофаза графита. Последняя присутствует во всех составах.

4. Влияние свободного углерода в виде нанографита на свойства композита значительно: снижает коэффициент трения, повышает износостойкость, повышает термическую стабильность, повышает прочность при высокой температуре, способствует получению материала с ультрадисперсной нанокристаллической структурой карбида и металла.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К сожалению экологов, большинство исследователей и производителей покрытий вынуждены использовать взрывоопасные газы и их смеси с водородом для нанесения карбидных и других углеродосодержащих композитов. Примененный в этой работе технологический процесс является прорывным. Во-первых, в нем, используя технику ВИПМР, можно распылять из одной мишени любые материалы, задавая их концентрацию простым соотношением площадей в зоне максимальной эрозии мишени. Во-вторых, любые карбиды можно получать простым совместным распылением металла и графита без подачи в рабочий объем камеры взрывоопасных газов. Они просто не нужны в данном процессе. В-третьих, управляя режимом распыления (плотностью мощности плазменного разряда) можно в широком диапазоне менять структуру и фазовый состав (содержание свободного аморфизированного графита) и соответственно управлять свойствами, например, твердостью, износостойкостью и коэффициентом трения, важнейших экс-

плуатационных характеристик композиционных покрытий на основе карбидов.

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 $l_e = 12,25[\text{Å}] / \sqrt{\epsilon} \approx 7,6$ нм. Здесь ϵ – кинетическая энергия электрона в эВ. В средах влияние возмущения с характерным размером l (или $l_e = 7,6$ нм) оказывает существенное влияние на размерах в несколько раз больших, порядка $10 \cdot l$ (или 76 нм). Следовательно, нанотехнологии это – технологии, используемые в комфортных для человека условиях (при комнатной температуре), в которых основным элементом конструирования композитных материалов может оказаться поляризационный захват одного или нескольких свободных электронов [6, 19]. Электрон обладает отрицательным зарядом. Кулоновские потенциалы, модифицирующие свойства нанобъектов возникают в результате формирования и модификации двойных слоев объемного заряда в нейтральных наноструктурах [6, 19] (рис. 6). 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 макро-свойства нанокompозитов. Это явление обусловлено нарушением нейтральности на наноразмерах (рис. 6). 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 макро-структуры с уникальными свойствами и функциями. Это понимание, поис-

тине, революционный шаг, приводящий к радикальным изменениям в технологии производства новых материалов для различных отраслей промышленности. Углеродные структуры обладают большим сродством к электрону, а полые структуры типа фуллеренов, нанотрубок и иных замкнутых структур, ограниченных плоскостями графена, могут осуществлять захват резонансных электронов и тем модифицировать свойства нанокompозитов, содержащих наноструктурированный углерод (рис. 6).

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.

В данной работе исследованы основы механизма образования прочной связи между физически легированными кристаллами карбидов переходных металлов и наноструктурами углерода и осуществлен выбор оптимальных композиций и состава покрытия для элементов наноэлектроники и оптоэлектроники. Метод физического легирования, разработанный авторами, не имеет мировых аналогов и будет применяться для решения задач наноэлектроники и оптоэлектроники. В чистом виде карбиды имеют повышенную хрупкость. Для повышения их пластических свойств в состав карбидов вводят металлическую фазу и измельчают зерно, затем их спекают. Нами для сохранения мелкозернистости карбидов, при долгосрочной эксплуатации приборов на их базе, предложен оригинальный метод физического легирования нанокристаллов карбидов структурами из углерода, являющимися ловушками для свободных электронов. Структуры из углерода, поляризуясь, вытягивают на себя часть свободных электронов композита. Сами заряжаются отрицательно, а отдавшие свободные электроны нанокристаллы карбидов заряжаются положительным зарядом. По этой причине положительно заряженные нанокристаллы карбидов не рекристаллизуются со временем. Физически легированные материалы предлагается создавать при использовании технологии высокоскоростного ионно-плазменного магнетронного распыления (ВИПМР) [Vysikaylo, P.I.; Mitin, V.S.; Mitin, A.V.; Krasnoabaev, N.N.;

Belyaev, V.V. Plasma Metallization Coating and Its Adhesion to Microwave Transistor Substrate-Part 2: Experimental Study of 3D Composite Coating // Plasma Science, IEEE Transactions on Volume: 43, Issue: 99, Publication Year: 25 May, 2015, Page(s): 1901-1905. DOI: 10.1109/TPS.2015.2419694. Ресурс доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7112521/>]. В качестве современного инструмента для нанесения покрытий из карбидов физически легированных наноструктурами углерода нами предлагается метод высокоскоростного ионно-плазменного магнетронного распыления – ВИПМР, то есть для нанесения карбидных и других углеродосодержащих композитов не будут применяться взрывоопасные газы и их смеси с водородом, в отличие от других технологий, используемых при исследовании и производстве покрытий. С помощью этого метода мы предлагаем одновременно управлять наноструктурой композита, как относительной концентрацией, так и размерами наноструктур кристаллов карбидов, металла и наноструктур углерода. Этот метод обладает широким спектром технологических возможностей, как по отношению нанесения на одно оборудование различных материалов, так и комплексного использования различных методов активации подложек. Метод позволяет осуществлять при определенных условиях (изменение плотности мощности плазменного разряда в диапазоне значений от 40 до 125 Вт/см²) совместное распыление из мозаичных мишеней различные композиции материалов, например, металл-графит, металл-карбид-графит, карбид-металл, карбид-графит и в широком диапазоне варьировать как состав (соотношением площадей, занимаемых металлом, карбидом и графитом), так и дисперсностью кристаллической структуры, изменением мощности разряда. Скорости нанесения покрытий из карбидов этим методом при таких плотностях мощности распыления материалов (металла и графита) составляет 0,1 до 0,7 мкм/мин, что практически на порядок больше, чем при обычном магнетронном распылении (MRS-PVD) и вакуумно-дуговом распылении (ARC-PVD). Кроме того, этот метод позволяет практически перейти к другому механизму взаимодействия углерода и металлов при их распылении ионной бомбардировкой. Если при использовании газов образование карбидов происходит непосредственно на мишени и затем идет молекулярный перенос карбидов через распыление на подложку, то при ВИПМР из мозаичных мишеней идет совместное распыление атомов углерода и металла и взаимодействие между ними, как в потоке пара, так и на подложке. В этом случае

мы можем получать не только карбиды, но и другие фазы, включая нанокристаллические и наноструктуры металла. Подтверждением этому является процесс нанесения композиционного покрытия металл-углерод, где металл не взаимодействует с углеродом, например: медь-углерод [Высикайло Ф.И., Денисов В.Н., Митин В.С., и др. Исследование медь-углеродных композитных покрытий с управляемой наноструктурой. // Нанотехника. 2010. № 4 (24) ст. 10–22; P. I. Vysikaylo, V. S. Mitin, A. A. Markin, A. Yu. Yakovlev, V. V. Belyaev Cooper-Carbon Nanostructured Composite Coatings with Controlled Structure // Open Journal of Applied Sciences, 2016, 6, 195–207. http://file.scirp.org/Html/7-2310565_65243.htm]. Покрытие в этом случае имеет двухфазный состав, состоящий из наноструктур металла и фазы нанокристаллического углерода [19].

Перечислим основные задачи, решенные в данной работе:

1) Осуществлены:

- а) выбор кандидатных материалов и их концентрации для слоев покрытий из карбидов переходных металлов, физически легированных наноструктурами углерода;
- б) разработка и изготовление мишеней;
- в) синтез методом магнетронного распыления покрытия из карбидов переходных металлов с различным относительным содержанием углерода, физически легирующим нанокристаллы карбидов;
- г) эксперименты и расчеты по установлению структуры нанозерен карбидов и состава межзеренных интерфейсных слоев – наноструктур углерода в распыляемых композитных мишенях и синтезированных слоях покрытия из карбидов переходных металлов с различным относительным содержанием углерода;
- д) оптимизация состава мишеней для формирования покрытия из карбидов переходных металлов с различным относительным содержанием углерода;
- е) разработка композитных многофазных мишеней, обеспечивающих стабильное магнетронное распыление, для магнетронного синтеза покрытия из карбидов переходных металлов с различным относительным содержанием наноструктур углерода.

2) Созданы физически легированные наноструктурами из углерода нанокристаллические композиты из нанокристаллов карбидов переходных металлов и исследованы их свойства. Эти высокотем-

пературные наноструктурированные материалы на основе химических соединений переходных металлов IV–VI групп периодической системы элементов с углеродом представляют интерес, как с точки зрения фундаментальной науки, так и для создания современной техники 4+ и 5-го поколений. Среди этих соединений, как показали исследования, особое место занимают карбиды, обладающие высокой температурой плавления от 2580 °С – полукристаллический молибден и до 3880 °С – карбид тантала, твердостью до 30 ГПа, износостойкостью, коррозионной устойчивостью, стойкостью по отношению к расплавленным металлам, малой упругостью паров и малой скоростью испарения. Наноструктурированные композиты обладают комплексом свойств, важных для многих задач микро- и нанoeлектроники: высокая температура плавления, большая твердость, износостойкость, коррозионная устойчивость, стойкость по отношению к расплавленным металлам, малая упругость паров и малая скорость испарения, слабая рекристаллизация наноструктур. Эти свойства определяют высокую эффективность применения наноструктурированных наноструктурами из аллотропных форм углерода композитов, а значит, определяют научную и прикладную значимость предлагаемого нами метода физического легирования нанокристаллических композитов.

- 3) Разработан метод получения и управления свойствами наноструктурированных композиционных многофазных покрытий (на основе карбидов переходных металлов) с высокой микротвердостью до 30 ГПа, низким коэффициентом сухого трения до 0,13–0,16, с высокой термостойкостью до 3000 °С и термостабильностью в нанокристаллическом состоянии более 1200 °С. Управление нанокристаллической структурой и свойствами карбидных композитных многофазных покрытий осуществлялось изменением концентрации в них свободного углерода с образованием в составе материала фазы аморфного нанокристаллического углерода. Установлено, что наличие нанокристаллического углерода в композите существенно повышает ударную вязкость и расширяет спектр возможных применений по сравнению с чистыми карбидами.
- 4) Разработан новый технологический процесс физического легирования наноструктурированных композитных материалов, являющийся прорывным и «зеленым» (экологич-

ным). Во-первых, в нем, используя технику высокоскоростного ионно-плазменного магнетронного распыления (ВИПМР), можно распылять из одной мишени любые материалы, задавая их концентрацию простым соотношением площадей в зоне максимальной эрозии мишени. Во-вторых, любые карбиды можно получать простым совместным распылением металла и графита без подачи в рабочий объем камеры взрывоопасных газов. Они просто не нужны в данном процессе. В-третьих, управляя режимом распыления (плотностью мощности плазменного разряда) можно в широком диапазоне менять структуру и фазовый состав (содержание свободного аморфизированного графита) и соответственно управлять свойствами, например: твердостью, износостойкостью и коэффициентом трения, важнейших эксплуатационных характеристик композиционных покрытий на основе карбидов. При использовании технологии ВИПМР для нанесения карбидных и других углеродосодержащих композитов не будут применяться взрывоопасные газы и их смеси с водородом, в отличие от других технологий, используемых при исследовании и производстве покрытий.

- Разработана в [9, 14, 15] и верифицирована [3, 6–8, 19], в том числе и данными экспериментами на различных физически легированных кристаллах теория квантово-размерных эффектов, обусловленных захватом свободных электронов нанокристаллов легирующими наноструктурами, выполняющими функции ловушек для свободных электронов композита (на примере наноструктур из углерода).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-07-00469, 17-07-00945 и 18-07-00897).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Vaganov V. E., Zakharov V. D., Reshetnyak V. V.** Carbon-containing nanocomposites based on copper for functional and structural purposes // *Materials Science (Materialovedenie – RF Russia)*. 2013. No. 8. PP. 25–31.
2. **Korolyanchuk D. G., Nefedov V. G., Bukatina M. R., Schebelskaya M. P., Zakharov V. D., and Vaganov V. E.** Electrolytic Composite Coatings Based on Copper with Carbon Nanomaterials // *Bulletin of the National Technology University «Kharkov Polytechnical Institute»*. 2014. № 30. P. 1139.
3. **Medvedev V. V., Popov M. Y., Mavrin B. N., Denisov V. N., Kirichenko A., Tat'yanin E. V., Ivanov L. A., Aksenonkov V. V., Perfilov S. A., Lomakin R. and Blank V. D.** Cu-C60 nanocomposite with suppressed recrystallization. *Applied Physics A*, 105 (2011), 45–48. DOI: 10.1007/s00339-011-6544-4 (2011).
4. **Zameshin A., Popov M., Medvedev V., Perfilov S., Lomakin R., Buga S., Denisov V., Kirichenko A., Skryleva E., Tatyannin E., Aksenonkov V., Blank V.** Electrical conductivity of nanostructured and C60-modified aluminum. *Applied Physics A*, 107 (2012), 863–869, DOI: 10.1007/s00339-012-6805-x.
5. **Maniks J., Mitin V., Kanders U. et al.** Deformation behavior and interfacial sliding in carbon/copper nanocomposite films deposited by high power DC magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 276. PP. 279–285.
6. **Vysikaylo P. I., Mitin V. S., Markin A. A., Yakovlev A. Yu., Belyaev V. V.** Cooper-Carbon Nanostructured Composite Coatings with Controlled Structure // *Open Journal of Applied Sciences*, 2016, 6, 195–207. DOI: 10.4236/ojapps.2016.63021 Google-based Impact Factor: 0,34.
7. **Blank V., Vysikaylo P. et al.** C60 – doping of Nanostructured Bi-Sb-Te Thermoelectrics. *Phys. Status Solidi A*. 2011. 208. PP. 105–113.
8. **Sychov M. M., Mjakin S. V., Ogurtsov K. A., Rozhkova N. N., Belyaev V. V., Vysikaylo P. I., Nakanishi Y., Ringuede A.** Effect of shungite nanocarbon deposition on the luminescent properties of ZnS: Cu particles. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. Vol. 519. PP. 19–24.
9. **Vysikaylo P. I.** Physical Fundamentals of Hardening of Materials by Space Charge Layers. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010. 46(4). PP. 291–298. Ресурс доступа: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375510040010>.
10. **Larry A Burchfield, Mohamed Al Fahim, Richard S Wittman, et al.** Novamene: A new class of carbon allotropes. *Heliyon*, 2017, Ресурс доступа – <http://dx.doi.org./10.1016/j.heliyon.2017.e00242>.
11. **Высикайло Ф. И., Митин В. С., Митин А. В., Краснобаев Н. Н., Беляев В. В.** О механизме адгезии покрытия к диэлектрической подложке

- из неорганических материалов для повышения качества металлизации при охлаждении СВЧ-транзисторов ч. 2. экспериментальные исследования адгезии металлического покрытия и решения проблемы охлаждения мощных СВЧ-транзисторов. // ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА. 2014. № 1(156), с. 73–82.
12. **Vysikaylo, P.I., Mitin, V.S., Mitin, A.V., Krasnobaev, N.N., Belyaev, V.V.** Plasma Metallization Coating and Its Adhesion to Microwave Transistor Substrate-Part 1: Methods of Experimental Research // Plasma Science, IEEE Transactions on Volume: 43, Issue: 4 Publication Year: 02 Март (March) 2015, Page(s): 1088–1092. DOI: 10.1109/TPS.2015.2404833.
 13. **Vysikaylo, P.I., Mitin, V.S., Mitin, A.V., Krasnobaev, N.N., Belyaev, V.V.** Plasma Metallization Coating and Its Adhesion to Microwave Transistor Substrate-Part 2: Experimental Study of 3D Composite Coating // Plasma Science, IEEE Transactions on Volume: 43, Issue: 99, Publication Year: 25 May, 2015, Page(s): 1901 – 1905.
 14. **Vysikaylo P.** Cumulative Quantum Mechanics (CQM). Part I: Prerequisites and Fundamentals of CQM. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry 2012. 48. № 4. P. 293–305. DOI 10.3103/S1068375512040187.
 15. **Vysikaylo P.** Cumulative Quantum Mechanics (CQM). Part II. Application of Cumulative Quantum Mechanics in Describing the Vysikaylo Polarization Quantum_Size Effects. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry 2012. 48. № 5. P. 395–411. DOI: 10.3103/S1068375512050158.
 16. **Высикайло Ф.И.** Самоорганизующиеся кумулятивно-диссипативные нано-структуры в легированных кристаллах. Парадоксы в квантовой механике и их решение на базе кумулятивной квантовой механики // Инженерная физика. 2013. № 3. С. 15–48.
 17. **Высикайло Ф.И.** Поляризация аллотропных полых форм углерода и её применение в конструировании нанокompозитов // Нанотехника. 2011. Т. 1. № 25. С. 19–36.
 18. **Мармер Э.Н., Турвич О.С., Мальцев Л.Ф.** «Высокотемпературные материалы», Металлургия, М., 1967 г., с 139–176.
 19. **Высикайло Ф.И., Митин В.С., Яковлев А.Ю., Беляев В.В.** Модификация свойств наноструктурированных медь-углеродных композитных покрытий. // ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА. 2017. № 1(165), с. 18–33.
 20. **Tuinstra F., Koenig J.L.** Raman spectrum of graphite, J. Chem. Phys. 53 (1970) 1126–1130.
 21. **Robertson J.** Diamond-like amorphous carbon, Mater. Sci. Eng. Rep. 37 (2002) 129.
 22. **Ferrari A.C., Robertson J.** Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon // Phys. Rev. B61 (20) (2000) p. 14095–14107.
 23. **Robertson J.** // Surf. Coat. Technol. 50 (1992) 185.
 24. **Dieterle M., Weinberg G., Mestl G.** Raman spectroscopy of molybdenum oxides (Part I): Structural characterization of oxygen defects in MoO_{3-x} by DRUV/VIS-, Raman spectroscopy and X-ray Diffraction. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2002. V. 4. № 5. P. 812.
 25. **Christensen A.N., Dietrich O.W., Kress W., Teuchert W.D.** // Phys.Rev. B, 19 (1979). 5699.
 26. **Cassinese A, Iavarone M., Vaglio R., Grimsditch M., Uran S.** // Phys. Rev. B, 62 (2000). 13915.
 27. **P. I. Vysikaylo, V. S. Mitin, E. E. Son, V. V. Belyaev.** Physical Alloying of Plasma Metallization Nanocomposite Coating by Allotropic Carbon Nanostructures. Pt.1. Experimental Research // Plasma Science, IEEE Transactions on Volume: 46, Issue: 5, Publication Year: 2018, Page(s): 1775–1780.
 28. **P. I. Vysikaylo, V. S. Mitin, V. V. Belyaev.** Physical Alloying of Plasma Metallization Nanocomposite Coating by Allotropic Carbon Nanostructures. Pt.2. Analytical Research // Plasma Science, IEEE Transactions on Volume: 46, Issue: 5, Publication Year: 2018, Page(s): 1781–1785.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕГАТИВНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ СЕРИИ ФН-16У ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАСКИ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

► М. М. Афанасьев¹, Н. А. Кузнецова², Т. В. Чальцева²

¹АО «Ангстрем»; ²ФГУП «ГНЦ «НИОПИК»

Показано, что «взрывная» фотолитография с фоторезистами серии ФН-16У позволяет производить качественную металлизацию подложек тугоплавкими металлами (Pt) без использования установок ионно-лучевого травления. В технологии можно использовать как проекционный, так и контактный способ формирования скрытого изображения в пленке фоторезиста, а также получить существенную экономию драгоценного металла.

THE USE OF NEGATIVE PHOTORESISTS FN-16U SERIES TO PRODUCE A METAL MASK OF REFRACTORY METALS

M. M. Afanasyev¹, N. A. Kuznetsova², T. V. Chaltseva²

¹SC «Angstrom»; ²FSUE «SSC «NIOPIK»

It was shown that the lift-off photolithography with photoresists FN-16U series gives high-quality metallization of substrates with refractory metals (Pt) without the use of ion-beam etching units. The technology can be used with both projection and contact methods to create image in the photoresist film, as well as to obtain significant savings in precious metal.

В последнее десятилетие расширяется использование негативных фоторезистов в новых технологиях, например, таких как изготовление резонансных решеток для биосенсоров [1], сенсоров поверхностных акустических волн [2], микроразмерных светоизлучающих диодов [3] и др. В рамках настоящей работы отечественные негативные фоторезисты серии ФН-16У были использованы для металлизации пленок сегнетоэлектриков тугоплавкими металлами.

Технология формирования микросхем на полупроводниковых пластинах включает в себя металлизацию подложки для создания металлических контактов и токопроводящих дорожек, в том числе из тугоплавких металлов типа платины и вольфрама. С этой целью используются дорогостоящие установки ионно-лучевого травления. В настоящей работе на примере подложки со слоем титаната бария показано, что металлизацию сегнетоэлектриков тугоплавкими металлами (Pt) можно

осуществлять по альтернативной технологии методом «взрывной» фотолитографии с использованием отечественных негативных фоторезистов серии ФН-16У.

Фоторезист ФН-16У недавно разработан и производится во ФГУП «ГНЦ «НИОПИК» [4, 5] специально для «взрывной» фотолитографии. Различная степень разбавления фоторезиста позволяет формировать пленки различной толщины – от 2 до 10 мкм (модификации ФН-16У-2, ФН-16У-4 и ФН-16У-7).

Фоторезисты опробованы для двух видов формирования рисунка – методом контактной и методом проекционной печати.

При контактной печати последовательность операций была следующей. Фоторезист нанесли центрифугированием (3000 об/мин в течение 120 с) на кремниевые подложки диаметром 150 мм, на которых были последовательно сформированы слои SiO₂ (0,5 мкм), Ti (50 nm), BaSrTiO_x (200–270 nm). Нанесение фоторезистов производили с промотором адгезии. Сразу после нане-



Рис. 1. Профили скола маски фоторезистов ФН-16У-2 (1), ФН-16У-4 (2) и ФН-16У-7 (3), полученной проявлением скрытого изображения, сформированного методом контактной печати

сения производилась предэкспозиционная сушка на воздухе (20 мин), затем в термошкафу при 90 °С (40 мин). Получены слои толщиной около 2, 4 и 7 мкм в случае ФН-16У-2, ФН-16У-4 и ФН-16У-7 соответственно. Экспонирование в режиме «жесткого контакта» производилось на установке ЭМ-576. Оптимальная доза экспонирования составляла 75, 90 и 100 мДж/см² для ФН-16У-2, ФН-16У-4 и ФН-16У-7 соответственно. После экспонирования фоторе-

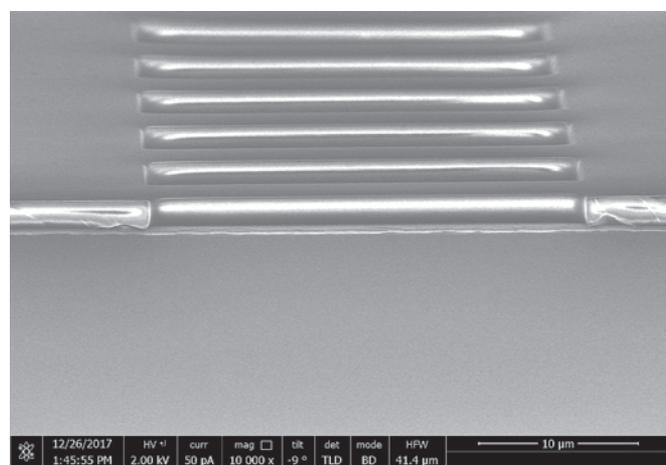


Рис. 2. Элементы маски фоторезиста ФН-16У-2, полученной после экспонирования (365 нм, 15 мДж/см²) и проявления (проявитель ПП-051МС)

зист подвергали постэкспозиционной сушке при температуре 97–98 °С в течение 20 мин, затем проявляли в водном растворе тетраметиламмония гидроксида с нормальностью 0,26 г-экв/л (проявитель ПП-051МС производства ФГУП «ГНЦ «НИО-ПИК»). Получено негативное изображение фотошаблона.

Профиль скола фоторезистов ФН-16У-2, ФН-16У-4 и ФН-16У-7 приведен на рис. 1, изображение получено с помощью растрового электронного микроскопа марки РЭМ Helios Nanolab (FEI). Во всех случаях наблюдали наличие отрицательного угла наклона маски фоторезиста (нависающий профиль боковых стенок, рис. 1), необходимого для выполнения металлизации подложки методом «взрывной» литографии [6]. Из данного рисунка следует, что наклон стенки увеличивается с ростом толщины слоя фоторезиста от 2 до 7 мкм. Таким образом, при контактной печати в более толстом слое фоторезиста отрицательный угол формировать легче.

Проекционная печать тестировалась на примере фоторезиста ФН-16У-2. Фоторезист наносили на кремниевые подложки диаметром 150 мм, на которых были последовательно сформированы слои окисленного кремния (0,5 мкм), оксида титана (30 нм), платины (200 нм) и титаната бария (от 70 до 300 нм). Обработка пластины перед нанесением фоторезиста включала следующие технологические стадии:

- а) обработку в плазме кислорода при 100W в течение 2 мин;
- б) отжиг в термошкафу при 90 °С в течение 20 мин;
- в) нанесение адгезива (гексаметилдисилазан) при 3000 об/мин, 20 с;
- г) термообработка при 115 °С в течение 1 мин.

Фоторезист ФН-16У-2 наносили методом центрифугирования (3000 об/мин, 2 мин). Сразу после нанесения фоторезиста производилась предэкспозиционная сушка на воздухе в течение 30 мин, затем в сушильном шкафу при температуре 90 °С (40 мин). Охлаждение до комнатной температуры производилось в ламинарном потоке очищенного воздуха в течение 20 мин. Толщина полученной пленки фоторезиста составила 1,93 мкм. Экспонирование производили на проекционной установке Кеннон № 212, ПШ М196-01В2. Суммарная доза экспонирования на длине волны 365 нм составляла около 15 мДж/см². После экспонирования фоторезист подвергали постэкспозиционной сушке на горячей плите при температуре 120 °С

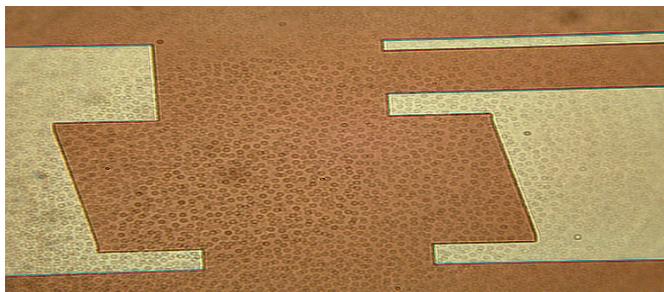


Рис. 3. Рисунок металла платины после «взрывной» фотолитографии с фоторезистом FH-16Y-2

в течение 60 с и проявляли с использованием проявителя ПП-051МС, время проявления составляло 53 с (в ванне). В результате было получено негативное изображение фотошаблона.

На рис. 2 показаны полученные после экспонирования и проявления элементы маски фоторезиста. Края элементов ровные, четкие.

Для тестирования «взрыва» на подложку с негативным изображением фотошаблона в вакууме осаждали слой платины толщиной 500 нм, «взрыв» производили растворением «жертвенного» слоя фоторезиста в диметилформамиде или ацетоне при комнатной температуре в течение 5 мин. После этого изделие промывали в деионизованной воде и высушивали на ЦНФ в течение 1 мин. На подложке оставалось четкое металлизированное изображение фотошаблона из платины (рис. 3).

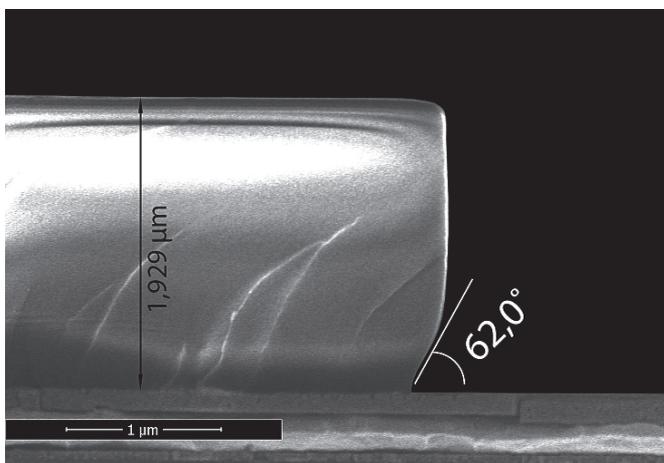


Рис. 4. Скол слоя фоторезиста FH-16Y-2, полученного с использованием проекционной печати: белый участок на рисунке соответствует фоторезисту, темный участок – проявленное окно. Изображение получено с помощью растрового электронного микроскопа марки РЭМ Helios Nanolab (FEI)



Рис. 5 Платина, извлеченная фильтрацией из диметилформамида после проведения «взрыва»

Наличие отрицательного угла наклона маски фоторезиста при проекционной печати демонстрирует рис. 4, на котором представлен скол фоторезистивного профиля FH-16Y-2. Вид профиля в этом случае отличается от полученного при контактной печати. Если при контактной печати отрицательный угол формировался сверху слоя фоторезиста, то в случае проекционной печати боковая стенка вертикальна, отрицательный угол сформирован у подложки. Такое различие объясняется разным распределением света по глубине слоя пленки фоторезиста. При контактной печати облучение производится параллельным пучком света, интенсивность которого из-за поглощения в верхних слоях по глубине снижается. Вследствие этого верхние слои пленки сильнее «зашиваются» и хуже растворяются в проявителе, обеспечивая нависающий профиль стенки. Уширение проявленного профиля у подложки обусловлено дополнительной «сшивкой» полимера за счет отраженного от нее света.

При проекционной печати пучок света сфокусирован на поверхности сегнетоэлектрического слоя BaSrTiO_x. Нижний слой недоэкспонирован и быстрее растворяется в проявителе, формируя отрицательный угол у подложки.

Следует отметить, что «взрывная» фотолитография позволяет извлекать фильтрацией частицы платины из растворителя после проведения «взрыва» (рис. 5). При серийном производстве это может дать значительную экономию драгоценного металла, что невозможно при использовании установки ионно-лучевого травления.

Таким образом, использование фоторезистов FH-16Y позволяет производить качественную металлизацию подложек тугоплавкими металлами (Pt), в том числе получать металлические контакты к сегнетоэлектрику, без использования дорогостоящей установки ионно-лучевого травления металлических пленок. В технологии можно использовать как проекционный, так и контактный способ формирования скрытого изображения в пленке фоторезиста. Показано, что при контактном способе отрицательный угол наклона стенки формируется легче в более толстом слое FH-16Y.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Arriola A., Rodriguez A., Perez N., Tavera T., Withford M.J., Fuerbach A., Olaizola S.M.** Optical Materials Express. 2012. Vol. 2. No. 11. P. 1571-1579. <https://doi.org/10.1364/OME.2.001571>.
2. **Ouyang G., Liu H., Ramic Z., Halvorsen E.** Langasite (La₃Ga₅SiO₁₄) wet-etching experiments and simulations. IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2009. DOI: 10.1109/ULTSYM.2009.5441711
3. **Kim T., Jung Y.H., Song J., Kim D., Li Y., Kim H., Song Il-S., Wierer J.J., An Pao H., Huang Y., Rogers J.A.** Small. 2012. Vol. 8. No. 11. P. 1643-1649. DOI: 10.1002/smll.201200382
4. **Кузнецова Н.А., Эрлих Р.Д., Соловьев В.В.** Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2017. Вып. 1 (165). С. 44-46.
5. Негативный фоторезист для «взрывной» фотолитографии. Патент РФ № 2648 048 С1 (2017)
6. **Моро У.** Микролитография. – М.: Мир, 1990. 1239 с.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ТЕХНОЛОГИИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА: ЧАСТЬ 3. УРОВЕНЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ

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

В этой части завершено обсуждение специфики биологических и социальных технологий. Раскрыта связь телеологического классификационного критерия для технологий и компонентов технологической операции (ТО). Предложено две концептуальные схемы, фиксирующие содержание понятия преобразования и ТО. На примере микроэлектроники обсуждаются возможные классификации ТО. Особое внимание уделяется раскрытию понятия «технэ» на уровне ТО. В контексте промышленной технологии выявлены общие тенденции эволюции ТО микроэлектроники.

GENERAL THEORY OF TECHNOLOGY AND MICROELECTRONICS: PART 3. TECHNOLOGICAL OPERATION LEVEL

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

MERIS C

This part completed the consideration of biological and social technologies specificity. The affinity of teleological classification criteria for technologies and technological operation (TO) components is revealed. Two conceptual schemes apprehending the transformation idea and TO structure are formalized. On the microelectronics example the possible classification of TO is discussed. Special attention is paid to the disclosure of «techne» within TO level. In context of industrial technology, general trends in the evolution of TO in microelectronics are revealed.

Уровень ТО является первым и, по-видимому, наиболее важным в исследовании технологии. Системный подход к ТО выражен еще в философии техники XIX века (Эрнст Гартиг): «По мнению Гартига, мы имеем одно из таких своеобразных технологических подчинений между понятием данного способа производства и понятием тех орудий, которые служат для осуществления этого способа. Таким образом, по Гартигу, понятие кузнечнойковки является высшим и подчиняющим по отношению к понятиям молоток, наковальня, горн» [1, 2]. Иными словами, ТО есть система из разнородных компонентов, связанных физически и семантически некоторым преобразованием. Однако каждый из этих компонентов в большинстве слу-

чаев есть продукт действия другой технологии; можно сказать, что одна технология порождает десятки других технологий, – в смысле, близком к высказыванию «нужда рождает изобретение, изобретение – две нужды». Поэтому не случайно структура ТО «удваивается» в классификации технологий по телеологическому признаку, то есть по признаку назначения изделия. Кроме того, подходя к ТО с точки зрения вычленения ее компонентов, мы косвенно обосновываем тезис дескриптивности [3].

Еще раз напомним эти компоненты, выделяемые с абстрактно-функциональной точки зрения:

- субстрат (или несколько субстратов) – substrate;
- процессор – operator;
- ресурсы – resources;

- технэ уровня ТО, описывающее условия проведения ТО, или рецепт – operation level techne, recipe;
- технологическая среда – ambient.

Неважно, чем конкретно представлены компоненты, важно, как они соотносятся с преобразованием. Субстрат – то, что (пассивно) подвергается преобразованию. Процессор – то, что совершает преобразование. Ресурсы – то, что необратимо расходуется в ходе преобразования (обычно: материя и энергия). Рецепт – то, что управляет ходом преобразования. Технологическая среда (Тс) – то, что повышает степень детерминированности преобразования. В среде обслуживающего персонала технологии микроэлектронной технологии ошибочно укоренился жаргонизм «техпроцесс», применяемый как эквивалент ТО.

Хотя доминирующим взглядом большинства исследователей на сущность ТО является процессно-динамический, тем не менее, для формализации ТО имеет значение многообразие дискурса даже в пределах ОТТ: с позиции ТМ важна целенаправленность преобразования, а с позиции ПП – роль процессора (оборудования и оснастки) и доставка ресурсов. С точки зрения R&D ТО представляет выбранную технологическую альтернативу из многих физико-технических способов решения инженерной проблемы. Наиболее пристально ТО изучали в пределах: 1) научной организации труда (в СССР эта дисциплина связана с работами В. М. Иоффе, Я. М. Пунского 1930-х гг. [4], а в США ее развивал Генри Форд, известный внедрением конвейерной сборки), где ТО определялась как минимальная единица трудовой деятельности; 2) металлообработки, где регламентировались выполняемые токарем или фрезеровщиком микрооперации, и отпечаток этого подхода до сих пор прослеживается в современной ЕСТД; 3) химической и пищевой промышленности [5], где рассматривались потоки (вещества, энергии, информации) и родилось представление о технологическом потоке (см., например, Романенко [6]). Большой вклад в изучение ТО в молодой тогда микроэлектронике в 70-х годах внесла начальник технологического отдела НИИМЭ Лилия Семеновна Штрауссе, которая определила, выделила и узаконила организацию рабочего места, требования к внешним условиям проведения операции. Непосредственным поводом к этому был выпуск в 1972 году в Польше микросхемы K155 на основе транзисторно-транзисторной логики [7].

Вначале мы продолжим ранее нами начатое сравнение естественных, промышленных и социальных

технологий, теперь – через призму компонентов ТО, уделив внимание признакам промышленной технологии (как стадии развития технологии вообще) на уровне ТО. Затем остановимся на существующих представлениях о ТО, акцентировав внимание на ее неэлементарности и делении на микрооперации, зафиксировав сложный характер ТО в компонентно-временной схеме. После этого, исходя из фундаментальности понятия процесса, дадим спецификацию ТО и сформулируем две концептуальные схемы для абстрактных преобразования и ТО. Далее мы обсудим вопросы классификации, в частности, наличие специальных видов ТО: транспортных, контрольно-измерительных и ремонтно-профилактических. Также попытаемся отобразить эти классификации на область микроэлектроники. Для лучшего и более «живого» понимания сущности ТО приведем некоторые факты из эволюции ТО фотолитографии, жидкостной химической обработки и ионной имплантации. В заключении мы перечислим еще раз понятия, возникающие на уровне ТО, и, наконец, дадим достаточно полное определение технологической операции.

КОМПАРАТИВНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ТРЕХ СФЕР. СТАДИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В табл. 1 проведено сравнение биологических, технических (производственных) и социальных технологий. Заметим, что оно носит предварительный характер, и его можно усилить при более глубоком исследовании, специфицировав ряд позиций. Введем аристотелевский термин «энтелехия», здесь это движущий фактор всех ТО и самой технологии – то, без чего технология «умирает». В классификации компонентов ТО это наиболее ценный из ресурсов, эссенциальный фактор. С некоторой долей условности можно выделить мишень преобразования, то есть то, на что в субстрате преимущественно направлены преобразования. Несмотря на деление технологий [3] на материальные, информационные, энергетические и транспортные, в каждой сфере они присутствуют в определенной пропорции; мишень преобразования отражает тот тип, который имеют наибольший вес. Сказанное можно сформулировать в виде небольшой гипотезы, отражающей «удвоение» технологий и ТО; ее обоснование оставим будущим исследователям.

Утверждение 1. (теорема двойственности) Внутри каждой сферы количественное распределение

Таблица 1. Общее сравнение сфер технологий (эскиз)

Сфера	Энтелехия (Эссенциальный фактор)	Мишень преобразования	Примечание
Естественная, клетка	Энергия	Молекулярные и надмолекулярные структуры живой клетки	Разветвленные, непрерывные технологии, пространственно близкие друг к другу и связанные сильными обратными связями
Естественная, организм	Энергия	Ткани, кровь и другие физиологические жидкости	Несмотря на относительную автономность технологий, велика роль регуляции во времени и пространстве
Производственная	Деньги	Преимущественно материалы, структурированные материалы и незаконченные технические устройства	Преобладают линейные, дискретные технологии, которые пространственно разделены и слабо связаны обратными связями
Социальная, телесная	Деньги	Тело человека (сфера обслуживания), персонифицированные аксессуары	Как правило, линейные и короткие с нечетко определенным продуктом; активная роль субстрата
Социальная, духовная	Воля / интерес / общественная потребность	Навыки и знания (как «материя»), воля (как «энергия»), ценности и вера (как «информация»)	Как правило, линейные с нечетко определенным продуктом и слабой контролируемостью; активная роль субстрата; обычно финансово убыточны

технологий по телеологии совпадает с распределением ТО по мишеням преобразования.

Производственные технологии эволюционируют в сторону усложнения и формирования обратных связей, то есть происходит конвергенция к естественным технологиям. Производственную технологию с развитыми обратными связями назовем промышленной. Предельным случаем промышленной технологии выступает «высокая». По Самойлову В. Н. [8], «под высокими технологиями будем понимать такие технологии, в которых для получения высококачественного чистого продукта необходимо обеспечить минимальные объемы циркуляции, то есть уровень стабилизации обратных связей должен приближаться к уровню устойчивости прямых связей».

Обратные связи в контексте многоуровневой технологии, по-видимому, можно трактовать трояко: а) как стабилизатор преобразования (простейший пример: термopара, контролирующая нужную температуру в рабочей зоне); б) как влияние результатов контрольно-измерительных ТО (брак) через косвенную диагностику технологии на ее соблюдение,

на использованные материалы, на потенциальную замену/ремонт оборудования, временную остановку ПП; в) как управление уровнем производства изделий с учетом спроса.

В [9] Е. С. Горнев вводит термин «промышленная технология», отталкиваясь не от обратных связей, а от системности: «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 во взаимодействии с внешней средой. Условием существования этой системы является превышение денежных доходов над расходами». Отечественная технология микроэлектроники приобрела признаки промышленной примерно к 1975 году. Автор охарактеризовал промышленную технологию микроэлектроники 13-ю признаками, часть из которых взаимозависимы, но лишь четыре из них могут быть перенесены на уровень абстракции ОТТ (а внутри ОТТ – на уровень ТО), а именно:

- воспроизводимость;
- стабильность;
- определенность;
- эффективность управления для достижения высокого выхода годных.

Уместно обсудить детально все 4 признака позднее, для уровня ПП, а пока ограничимся краткими ремарками. Воспроизводимость – это близость результатов, полученных при различающихся пространственно-временных условиях. Воспроизводимость показывает, может ли процесс с данной вариацией параметров обеспечить удовлетворение заданных допусков.

В контексте уровня ТО и микроэлектроники результатом являются электрофизические свойства структуры в пределах будущего чипа, а условиями могут быть: а) время проведения ТО на одном и том же оборудовании; б) использование формально идентичного оборудования; в) местоположение чипа на пластине; г) местоположение пластины в реакторе. Стабильность, по ГОСТ Р 51814.3-2001, – отсутствие особых причин изменчивости (свойство статистически управляемого состояния процесса); стабильный процесс – это процесс, находящийся в статистически управляемом состоянии.

Таблица 2. Некоторые примеры компонентов ТО для различных технологий

Сфера	<Технология, операция>	Субстрат	Процессор	Ресурсы	Технэ	Среда
Промышленная	Микро-электроника, эпитаксия	Кремниевая пластина	CVD-реактор	Газы H ₂ , (SiH ₄ / SiCl ₄), вода, энергия на нагрев	Программное обеспечение (ПО), поставляемое вместе с реактором	Чистое помещение
	Микро-электроника, фотолитография (экспонирование)	Кремниевая пластина	Степпер, сканнер и фотошаблон	Электроэнергия	ПО оборудования	Помещение 100-го класса чистоты (в рабочей зоне – 1-й класс чистоты)
	Проектирование микросхем, Генерация транзисторного нетлиста	Проект в виде файлов VHDL-описания	САПР: утилита из пакета Cadence или др.	Библиотеки элементов СБИС (стандартные или собственные)	Знания схемотехники у проектировщика	Рабочее место проектировщика, место хранения проекта
	Нефтегазовая промышленность, сжижение газа (дано укрупненно)	Природный газ	Газопровод, компрессорные станции	Энергия, хладагенты, вода	ПО оборудования (автоматизированная система управления, АСУ ТП)	Территория компании, защищенная от внешних угроз
	Суперкомпьютерные вычисления, определение требуемых задач ресурсов	Исходные данные, включая алгоритмы, и требуемая точность	Специалист вычислительного центра, алгоритмы маршрутизации	Обновляемая информация о загруженности ВЦ, составе ПО	Опыт специалиста ВЦ, должностная инструкция	Не специфицировано; рабочее место специалиста с доступом к ВЦ

Таблица 2. Продолжение

Сфера	<Технология, операция>	Субстрат	Процессор	Ресурсы	Технэ	Среда
Естественная	Пищеварение человека, измельчение пищи	Поглощаемая пища	Язык и зубы	Слюна, мышечная энергия	Жевательные и др. рефлексы	Ротовая полость
	Трансляция белков, элонгация цепи	Полипептидная цепь	Рибосомы, ферменты	Аминокислоты, АТФ	Законы сродства: «триплетный кодон – аминокислота», отображенные на структуру ферментов	Не специфицировано; цитоплазма
	Репликация ДНК, элонгация цепи	Репликационная вилка	РНК-полимераза, ДНК-хеликаза и др. 15–20 ферментов	Нуклеиновые основания, АТФ	Законы комплементарности нуклеиновых оснований	Ядро клетки (у эукариот), цитоплазма (у прокариот)
Социальная	Дошкольное воспитание, прогулка	Группа детей	Воспитатель, качели	Психическая энергия, запас внимательности	Опыт воспитателя, инструкции	Территория детского сада
	Профессиональное воспитание, сдача экзамена в колледже/вузе	Экзаменующий или группа экзаменуемых	Экзаменатор и/или смотрящий за тестом	Экзаменационные листы, средства письма, билеты/вопросы/тест, запас внимательности	Выбранная экзаменатором форма (например, допускается ли пользоваться литературой?), опыт оценивания	Аудитория, учебный класс без посторонних
	Духовное воспитание, просмотр тематической передачи	Телезритель	Телевизор/компьютер, сетка телевидения (канал youtube) или личность (теле) ведущего/блоггера	Медиаконтент (например, программа «Время»)	Опыт ведения пропаганды (теле) вещателем	Свободное время человека (подвергаемого пропаганде)

Термин «определенность», который лучше перевести как *distinctness*, имеет оттенки «жесткости» (*hardness*), «полноты» (*completeness*) или «однозначности» (*unambiguity*). Это, конечно, выражение свойств «технэ» для промышленной технологии. Свойство эффективности обуславливается прежде всего обратными связями и отражается в фактическом выходе годных, для уровня ТО – конечным

состоянием субстрата. Оно коррелирует с безубыточностью как условием существования технологии, но все-таки следует предостеречь от отождествления; возможно, уместно разделять внутреннюю и внешнюю эффективность. Например, при резком росте стоимости электроэнергии кремниевая электроника, сохраняя тот же высокий процент выхода годных и сложную оптимизированную структуру,

проиграет органической электронике с низкотемпературными процессами. Но, нужно отметить, что органическая электроника, вряд ли, сможет когда-нибудь обеспечить высокий выход годных и сложнейшую функциональность, достигнутую кремниевой электроникой. Поэтому критерием нужно брать все-таки удельные затраты энергии на реализуемую функцию, которые для органической электроники по сравнению с кремниевой недостижимы.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОДХОДЫ. ИДЕЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Обратимся к стандартам Единой Системы Технологической Документации (ЕСТД, номера ГОСТ 3.1X), согласно которым выделяют три типа описания технологии: маршрутное, операционное (т. е. уровня ТО) и маршрутно-операционное. В ней ТО определяется [10] как «законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте». Также определяется типовая ТО как «технологическая операция, характеризующаяся единством содержания и последовательности технологических переходов для группы изделий с общими конструктивными и технологическими признаками» и групповая ТО как «технологическая операция совместного изготовления группы изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками». Дается также определение «технологического перехода», термина, при-

шедшего из металлообработки и для нас синонимичного термину «микрооперация». Технологический переход (manufacturing step) – законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установе. Там же даются другие вспомогательные термины, например, *установка* и *позиции*, характерные для токарных и сборочных работ (рис. 1), а также *оборудования* и *оснастки* (как средства технологического оснащения, дополняющие технологическое оборудование для выполнения определенной части технологического процесса = Tooling).

Для ОТТ такие спецификации ТО слишком конкретны и при всей пользе требуют абстрагирования, одновременно показывая неэлементарность ТО и, как правило, вложенность в нее микроопераций. Это актуально до сих пор при создании программного обеспечения уровня CAM (SprutCAM, [11]); например, токарные операции содержат микрооперации наружного и внутреннего точения, обработки торца, обработки отверстий, отрезки, нарезания резьбы. Кроме того, особенности физических объектов и процессов нанотехнологического производства отражены в ГОСТ 56662-2015 [12].

В нашем варианте ОТТ мы вводим трехстадийность ТО: *установ – ядро – размыкание*. Она логически проистекает из того, что необходимым условием преобразования является физический контакт процессора и субстрата; поэтому это условие обладает большой универсальностью, хотя нужно отметить специфику для поточных систем (см. пример с сжижением газа в табл. 2), где эта триада выражена не так ярко, как в микроэлектронике. ТО микроэлектроники отличаются комплексностью, разнородностью микроопераций, в частности, контроля *in situ*; современное оборудование всегда обладает встроенными средствами измерений качества во время самой ТО. Эта комплексность на примере ТО диффузии показана на рис. 2.

Такое деление имеет не только формальный характер; например, неизбежны естественные переходные процессы при сочленении процессора и субстрата. Известен эффект загрузки (loading effect) [14], когда состав парогазовой смеси, и, следовательно, скорость химических процессов, зависит от числа загруженных пластин; сам эффект напрямую относится к особенностям групповых ТО, но, тем не менее, косвенно иллюстрирует и стадию установка.

Загрузка пластин однозначно относится к стадии установка, а скорость их введения в рабочую

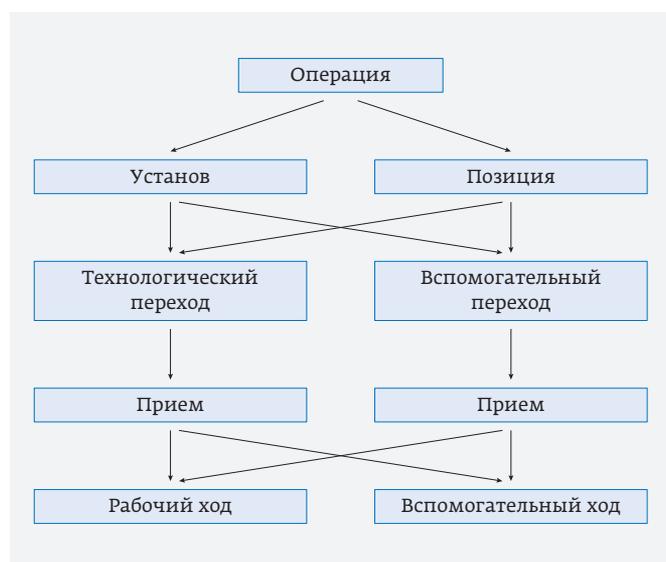


Рис. 1. Концептуализация ТО в научной организации труда и ЕСТД. Прослеживается историческая связь с обработкой деталей

зону подлежит регламентации. В «старых» технологических картах указывалась даже скорость загрузки и разгрузки пластин. Кстати, по скорости помещения пластин в рабочую зону и выема пластин из нее проводились специальные исследования. К лодочке с пластинами крепились термомпары, пластины контролировались на дефектность и, исходя из этого, определялись оптимальные режимы загрузки пластин в рабочую зону и выгрузки пластин оттуда. Крайний случай при ампульной диффузии мышьяка для создания скрытого слоя – выключение печи с последующей выгрузкой уже естественно остывшей ампулы с пластинами. В конце концов, пришли к автоматическим программируемым системам загрузки пластин.

Большинство ТО микроэлектроники содержат термические процессы, и требуется определенное время на разогрев и остывание, чтобы минимизировать привносимую дефектность; здесь возможна и инженерия (например, управление кристаллизацией при получении ситаллов), поэтому эти процессы следует отнести к микрооперациям ядра ТО. Стоит обратить внимание на неслучайность словар-

ной аналогии, когда говорят о «разогреве» публики перед выступлением какой-либо звезды эстрады. Таким образом, ТО несводима только к ядру ТО, к одноименным физико-химическим (или психологическим, если речь о социальных технологиях) процессам, которые преимущественно попадают в фокус исследования прикладных наук.

ТО «Диффузия» редко используется ныне из-за высоких температур (для легирования теперь применяется ионная имплантация), при этом до сих пор в диффузионных печах проводятся два вида процессов – высокотемпературные операции при атмосферном давлении (окисление и отжиг) и процессы осаждения из газовой фазы при пониженном давлении нитрида кремния, оксида кремния, поликристаллического кремния. Она проводится сейчас по схеме, отличающейся от приведенной на рис. 2 и отвечающей требованиям промышленной технологии. Эти отличия состоят в следующем:

- исходный кремний проверяется отделом качества по сопровождающим документам;
- время и температура закреплены жестко в рецептах, внесены в RMS, систему управ-

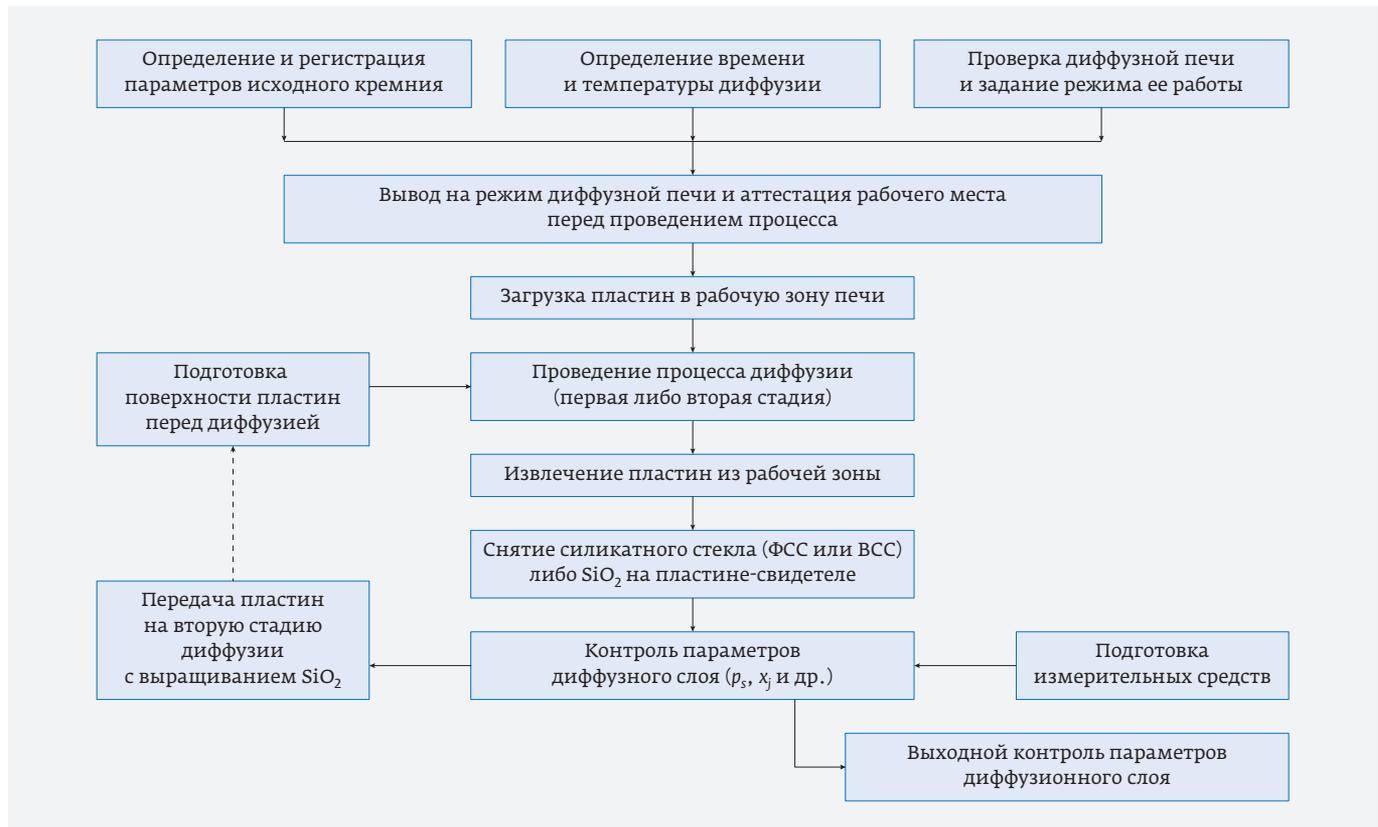


Рис. 2. Комплексный характер и трехстадийность ТО на примере ТО диффузии [13] в микроэлектронике 70-х годов. Примечание: «вторая стадия диффузии» имеет узкий смысл, отличный от стадий абстрактной ТО

ления рецептов. Если в рецепте были изменения (человеческий фактор), то партия не запустится;

- оборудование перед процессом не проверяется, так как есть график аттестаций, аттестация действительна на весь период до следующей аттестации (в крайнем случае, можно половину этого периода эксплуатировать установку), а далее оборудование опускается в состояние DOWN, чтобы не было обработок партий на неаттестованном оборудовании;
- подготовка поверхности перед диффузией осталась прежней, но внутри печи все процессы осаждения различных слоев выполняются по максимуму в одной загрузке, чтобы не было привносимых загрязнений при извлечении пластин из печи.

Понятие «преобразование» типизирует понятие «процесс», добавляя в него черты телеологичности и системности, причем последнее делается через отношение «операция – операнд», пришедшее из области информатики. Признак телеологичности, или целенаправленности, наследуется из вышестоящего уровня ТМ. Иными словами, функциональность изделия влечет за собой функциональность его элементов, для микроэлектроники – объемных областей твердого тела, поверхностных слоев, что для наноразмеров связано с наноструктурированием материалов, и, соответственно, разработкой и улучшением ТО. При проектировании ядра ТО часто, но не всегда, предполагается мишень преобразования (target of transformation), назовем ее X-системой; в общем и целом преобразование затрагивает весь субстрат, которое, несмотря на целенаправленность для X-системы, может приводить к нежелательным изменениям и, тем самым, запрещать то или иное изобретательское решение. *Мишень преобразования* – это целенаправленно модифицируемая структурная или функциональная подсистема субстрата.

Примером X-системы выступает слой субоксидов кремния SiO_x ($x < 2$), где в матрице диэлектрика расположены нанокристаллиты кремния; если их диаметр не превышает $1 \div 2,5$ нм, то эта структура за счет эффекта квантового конфайнмента обладает высоким квантовым выходом люминесценции и пригодна для оптоэлектроники, а если их диаметр около $3 \div 5$ нм, то эту структуру уместно использовать в качестве плавающего затвора в ячейках флеш-памяти. На рис. 3. представлено обобщение данной ситуации, где (без учета индексов i, j): E – одна из надсистем, в которую может входить X (вместе с усло-

виями вхождения); $T(X)$ – способ создания материальной системы X в виде ТО или цепочки ТО; $M(X)$ – несколько (математических) моделей, описывающих X; $F(X, E_i, M_j)$ – одно из свойств (функций) X при заданном окружении E_i , предсказываемое по заданной модели M_j ; $A(F)$ – область приложения материальной системы X, обусловленная наличием функций F (или их отсутствием).

Эквивалентом термину «преобразование» выступает «технологическое действие». По В. Ф. Турчину [15], «действие можно рассматривать в качестве первичной реальности и, следовательно, использовать в качестве элементарного блока при построении моделей окружающего мира... высокий онтологический статус действия обычно отбрасывается на том основании, что действие недостаточно фундаментально». На базе «действия» (action), которому мы в ОТТ приписываем две семантики, каузальную и пропозитарную [16], этот концепт, обладающий признаками целенаправленности и системности вводит Д. А. Андреев [17]. Он распространяется автором и на уровень ТМ, учитывая отношение иерархии и последовательно-параллельного следования ТО. Заметим, что в формальных конструкциях у Андреева целенаправленность отсутствует, хотя и декларируется. Тот же признак присутствует в определении В. Хубки [18]: «Преобразование есть следствие определенных воздействий, основанных на физических, химических, геометрических, биологических и других явлениях, описываемых некоторой инструкцией, рецептом, технологией, алгоритмом. Воздействия на операнд выполняются операторами. Эти воздействия являются выходами операторов. Воздействия

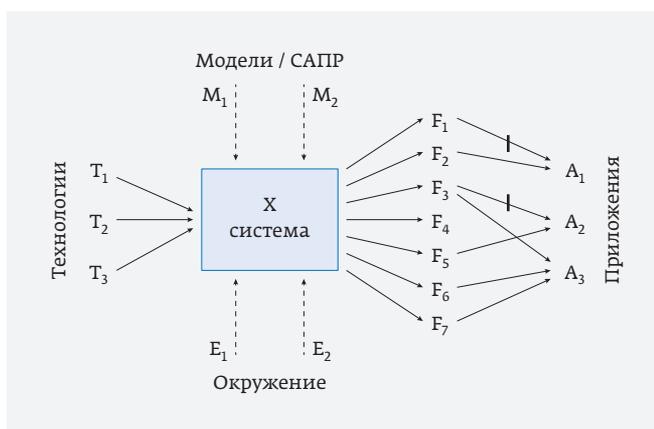


Рис. 3. Мишень преобразования как элемент конструирования ТО и экспликация ее телеологичности. Перечеркнутая стрелка означает негативность данного свойства с точки зрения данного приложения

операторов осуществляются в виде потоков материи (М), энергии (Э) и информации (И)». Особо отмечается, что оператором (процессором) может быть человек, другая техническая система или окружающая среда. Системность ТО равносильна пропозитарно-операторному взгляду на преобразование, где акцент делается не на связи «вход-выход», а на единстве всех компонентов ТО, выражаемому отглагольным наименованием оператора.

На рис. 4 представлена компонентно-временная структура ТО. Выделение компонентов ТО достаточно традиционно [19]. В качестве примера можно привести технологию создания информационных систем [20, 21], где ТО определяется как «относительно самостоятельный фрагмент технологического процесса проектирования, где определены: вход, выход, преобразователь, ресурсы и средства».

В этой сфере [22] «входом» и «выходом» являются документы в стандартизированной форме, под «средствами» понимаются САПР вместе с алгоритмами преобразования, а в качестве «ресурса» выступает, например, компьютер. Эта схема, по сути, детализирует IDEF0-нотацию (рис. 5а).

В природе редко детерминированные процессы и всегда присутствует неопределенность в состоянии операндов, процессоров и, обобщая, других компонентов ТО, что приводит к искажению «выхода» ТО и нарушению свойства воспроизводимости (reliability). Этот аспект, конечно, известен [23] (рис. 5), но не подвергнулся формализации. Если алгоритм преобразования не обладает воспроизводимостью, то нужна его модификация или отказ от его использования; если взять пример из современных, то широкому применению мемри-

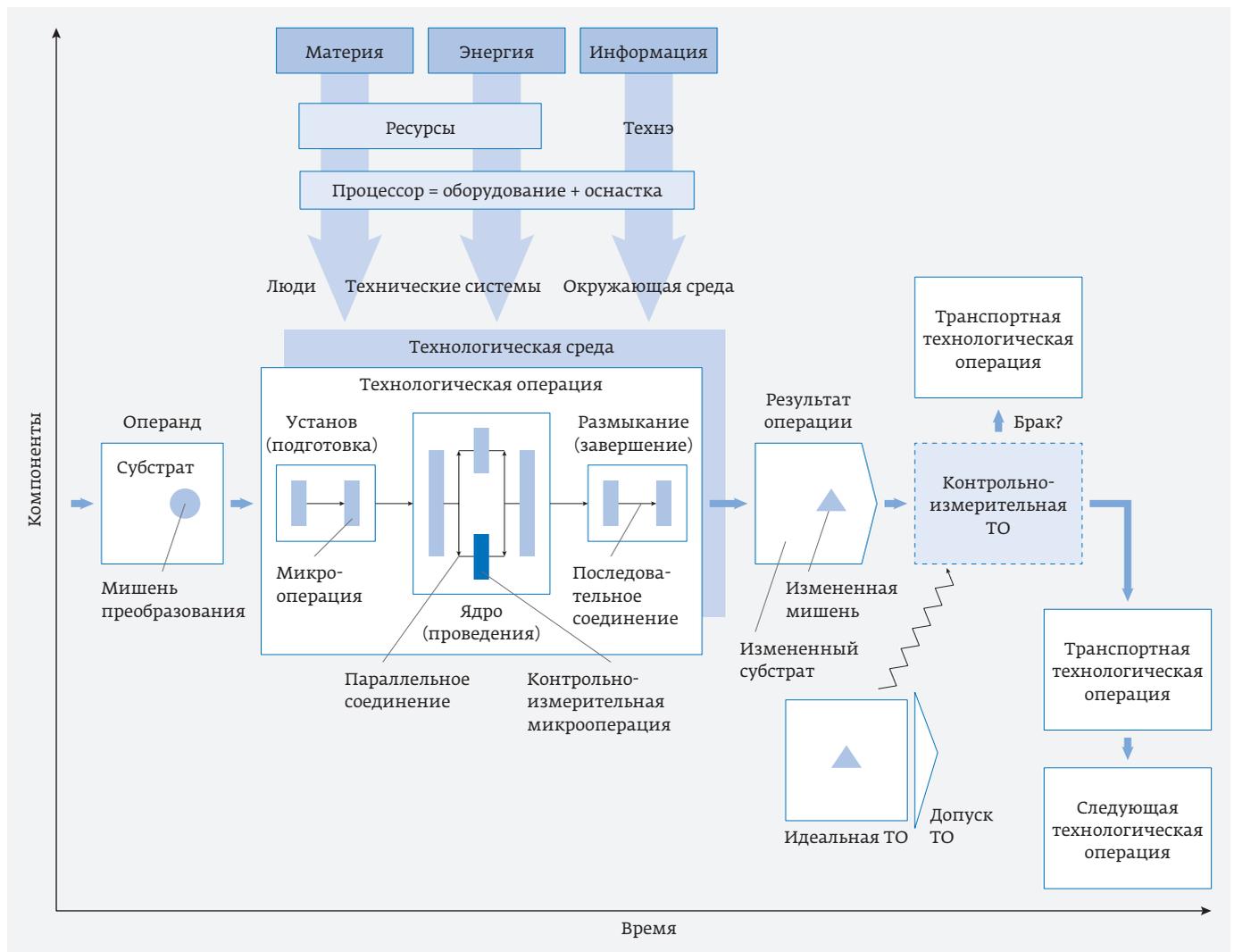


Рис. 4. Компонентно-временная структура ТО

сторных ячеек препятствует разброс напряжений переключений высокоомного состояния в низкоомное, и наоборот; этот эффект имеет место даже в пределах одной ячейки. В английском языке нет точного синонима воспроизводимости, два близких – reproducibility и, что более предпочтительно для ОТТ, reliability (часто переводится как надежность), а также robustness (робастность), если ТО рассматривать как систему, подверженную случайным воздействиям; впрочем, последний термин, по нашему мнению, имеет слишком жесткое для ОТТ значение. Напомним, что робастность – это способность системы сохранять заданный запас устойчивости при вариациях ее параметров; если эти вариации малы, то говорят о мягкой робастности (см. также [24] применительно к задачам управления ТО). Сам термин пришел из математической статистики и теории управления, а запас устойчивости мы связываем с выходом годных после ТО. Следует подчеркнуть, что анализ reliability для ТО (и тем более, для уровня ТМ) неизбежно должен иметь специфику по сравнению с традиционным [25] подходом, применяемым для технических систем. При этом принимать во внимание нужно не только свойства оборудования в качестве технической системы, но взаимодействие всех компонентов технологического преобразования, включая искусственно созданное окружение (ambient). Еще раз подчеркнем разницу: ambient отличается по статусу от environment, так как является частью системы «технологическая операция». Также ambient шире, чем иногда используемая в литературе связка «рабочая зона» (work/operating zone/area), имеющая нечеткий смысл. Функция «шумоподавления», относи-

мая к ambient, всегда оставляет элемент неопределенности, что делает релевантной для моделирования ТО модель «серого ящика» (рис. 5б) (если бы все определялось только состоянием оборудования, прежде всего, нового, то в микроэлектронике мы приближались бы к модели «белого ящика», имея на руках тесты и рецепты, поставляемые его производителем).

Остановимся на потоковом представлении о ТО, которое достаточно популярно и пришло из химической технологии [5], как и понятие «химико-технологическая система», близкое к уровню производственного процесса (ПП). Согласно [26], «совокупность процессов в машинах и аппаратах технологической линии есть, по существу, один большой процесс (поток). Несмотря на разнообразие технологий и машинно-аппаратурного оформления, общим для различных линий является то, что в них организован и функционирует непрерывный технологический поток преобразования исходного сырья в продукт... Технологический поток состоит из различных технологических операций преобразования исходного сырья и процессов транспортирования его и промежуточных продуктов между операциями». Отметим акцент на непрерывность, что, по-видимому, взято из производства конвейерного типа, но не снижает степени общности. По [5], «... условие непрерывности операции означает выполнение предусмотренной ею работы без перехода к обработке другого изделия». Согласно [27], технологический поток понимается ближе к уровню ТМ. Там же типизируется один из законов развития технических систем (по А. Любомирскому и Г. С. Альтшулеру): «В процессе их развития происходит

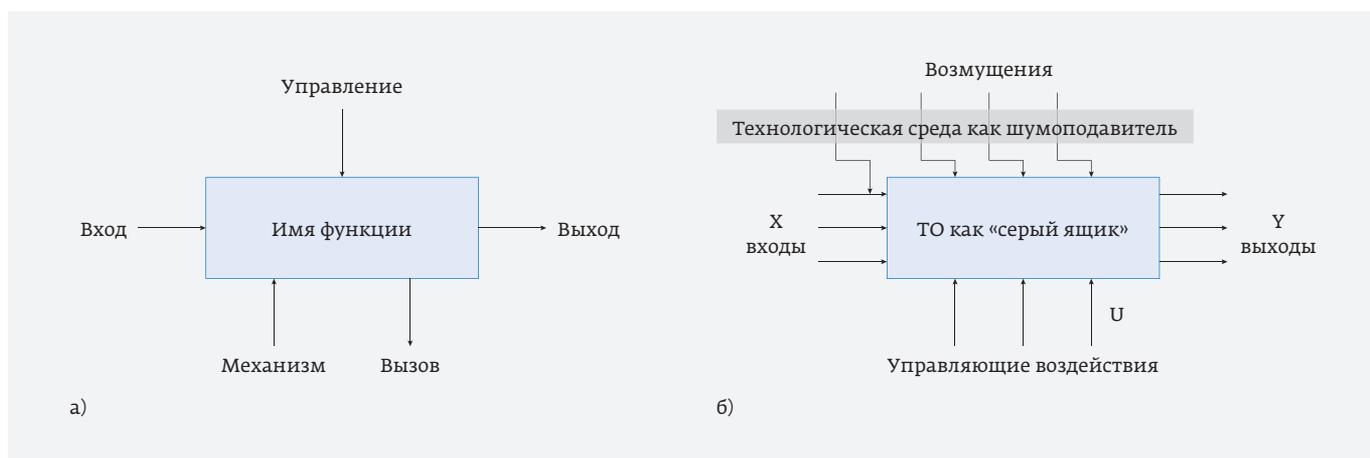


Рис. 5. Представление ТО в виде прямоугольника с четырьмя связями: а – ключевой элемент нотации IDEF0; б – ТО как преобразование, устойчивое к возмущениям (см. также [23])

повышение эффективности использования потоков М, Э, И, в том числе сокращение длительности». Поскольку ТО, во всяком случае, в сфере промышленности подразумевает использование технических систем, то речь идет о том, в какую сторону эволюционирует ТО, то есть

Утверждение 2. (теорема повышающейся эффективности) ТО эволюционирует в сторону повышения эффективности использования потоков М, Э, И и сокращения длительности при заданном уровне сложности субстрата или его преобразования.

Поясним нашу оговорку о сложности. В информационных технологиях ресурсоемкость операции «запись в файл» даже возросла, но ведь и размер файла «перерос» 4 Гб. Развитие фотолитографического оборудования приводит к росту цены, веса, энергопотребления, что как будто противоречит этому закону Альтшулера, но связано с уменьшением проектных норм и усложнением самой литографии.

Согласно Романенко [6], «технологическим потоком следует считать перемещение в пространстве и/или времени любой сущности, которая участвует в технологическом преобразовании... В отличие от теории технических систем, общее описание теории технологий оперирует не тремя, а большим числом различных типов технологических потоков. В первую очередь к трем традиционным потокам необходимо добавить потоки изделий, финансов и знаний». Несмотря на то, что с технологическим потоком ассоциируется довольно живая картина всеобщего движения в любом производстве или биологическом объекте, несмотря на привлекательность такого понятия, мы вынуждены отказаться от него на уровне ТО. Мы указали деньги как эссенциальный фактор промышленной технологии, но заметим, что деньги являются скорее условием ТО (и притом весьма опосредованным), чем непосредственным компонентом. Следовательно, финансовые потоки не являются понятием ОТТ на уровне ТО, но будут восстановлены на уровне ПП.

КОНЦЕПТУАЛИЗАЦИЯ И AB INITIO ФОРМАЛИЗАЦИЯ ТО

Пропозитарный взгляд присущ родственным стандартам SADT [28] и IDEF0/IDEF3 [29], предлагающим графическое оформление технологии (прежде всего на уровне ТО и ТМ). Напомним, что IDEF (Integrated Definition) – семейство методологий функционального моделирования, созданных в 1980–1990 гг. в рамках американской программы

компьютеризации промышленности. В методологии IDEF0 (рис. 5 дает несколько упрощенную схему) требуется только пять типов взаимодействий между блоками для описания их отношений: управление, вход, обратная связь по управлению, обратная связь по входу, выход-механизм. Стандарт IDEF3 посвящен документированию процессов, происходящих в системе (например, на промышленном предприятии), где описываются сценарий и последовательность операций для каждого процесса. IDEF3 имеет прямую взаимосвязь с методологией IDEF0 – каждая функция (функциональный блок) может быть представлена в виде отдельного процесса средствами IDEF3. Единицы работы – Unit of Work (UOW), также называемые работами (activity, почти синонимично с action = «действие», что обсуждалось ранее), – являются центральными компонентами модели IDEF3. Они изображаются прямоугольниками с прямыми углами и имеют имя, выраженное отглагольным существительным, обозначающим процесс действия, одиночным или в составе фразы, и номер (идентификатор); иногда указывается продолжительность. Связи показывают взаимоотношения работ.

Выделим три базовых графических представления ТО и / или цепей ТО (фрагментов ТМ) через:

1. *Граф*. Ребра графа обозначают процессы (обычно надпись под стрелкой), а узлы – состояние операндов. Выходы и входы процессов изображают стрелками и точками. При проектировании ТМ в микроэлектронике часто используется визуализация последовательности боковых или плоскостных проекций топологий фрагмента СБИС;
2. *Блок-схема*. В этом случае процесс изображают в форме прямоугольника с текстом или рисунком. Характерно для операторного взгляда IDEF3 (рис. 5а). Часто прямоугольник ограничивает подсистемы. Подсистема содержит два или более операторов, которые отражают понятие технологических операций и границы которых в большинстве случаев совпадают с границами машин и аппаратов. Оператор, в свою очередь, содержит один, два и более процессоров, которые отражают в общем случае содержание физико-химических и микробиологических процессов. Линии со стрелками – материальные потоки – являются связями между операторами и подсистемами, а также между системой и внешней средой.
3. *Циклограмма*. Такая диаграмма позволяет наглядно представить последовательность

и привязку (микро)операций или ключевых параметров (давление, температура, концентрация газа или включение/выключение аппарата) во времени, что бывает полезным для технолога-оператора. В экономике аналогом выступают диаграммы Ганта.

С одной стороны ТО является «кирпичиком» для определения ТМ и, как будто, более фундаментально, однако, с другой стороны, нельзя определить ТО изолированно от ТМ. Это замечание имеет принципиальный методологический характер, осложняющий существующую формальную ситуацию и находящий отражение в первых двух графических формализациях.

Понятие ТМ обоюдно родственно к понятию алгоритма, поэтому уместно обратиться к известным формализациям алгоритма, ведь последний – не что иное, как ТМ для информационных технологий. Выделим два примера, относимых к началу 50-х годов 20 века: язык Ляпунова [30, 31] и язык алгорифмов Маркова-младшего [32,33]. Первый изрядно подзабыт, хотя любимое всеми программистами слово «оператор» и концепция программы (как последовательной записи операторов) введены выдающимся советским кибернетиком А. А. Ляпуновым. При символическом описании такого рода ТО обозначаются прописными латинскими буквами, а условия – строчными. Таким образом, запись $q(90, H7)$ означает, что задается получить диаметр 90 с допуском H7. Согласно «языку Ляпунова», каждой логической операции соответствуют вертикальные стрелки, причем $\uparrow\downarrow$ обозначает начало и $\downarrow\downarrow$ – конец логической операции. Так, выражение $\uparrow\downarrow Aq(90, H7)\downarrow\downarrow B$ означает следующее: провести операцию A (например, обточки), затем проверить, выполняется ли условие q. Если оно выполняется, то осуществляется

операция B (например, фрезерование паза). Если оно не выполняется, то следует повторить операцию A, что обозначается стрелкой после q. Понятие нормального алгоритма введено А. А. Марковым-младшим и до сих пор активно используется; о его применении к ТО и ТМ микроэлектроники см. [34]. Исходное слово отображает структуру субстрата, а расширенный алфавит содержит буквы (знаки) ТО, которые вместе со служебными перемещаются по слову и по правилам подстановки совершают в нем изменения.

Вернемся, однако, к изначальным вопросам концептуализации и изложенному в предыдущем пункте. В нашем варианте ОТТ понятие ТО выводится из понятия «процесс» через понятие «преобразование», последовательным добавлением признаков системности (пропозициональности или операторности), телеологичности (целенаправленности) и воспроизводимости (робастности), что иллюстрируется рис. 6.

Зафиксируем этот результат в виде небольших двух концептуальных схем (КС), наследованных от КС «Процесс» (см. часть 2).

КС «Абстрактное преобразование»

Исходные понятия:

- *Units* – множество элементов (вместе с их состояниями), включая субстрат, процессор, отходы и т. п. ;
- *Conds* – множество условий осуществления (вместе с наименованием преобразования);
- *Aims* – множество целей;

Отношения (структуры):

- $D_Oper - 1)$ «вход» и «выход» сложные, состоят из элементов; 2) «выходу» соответствует «выход», если выполнено некоторое условие – $D_Oper \in B(B(Units) \times Conds \times B(Units))$;
- D_Teleo – с преобразованием ассоциирована цель (или цели) – $D_Teleo \in B(D_Oper \times B(Aims))$;

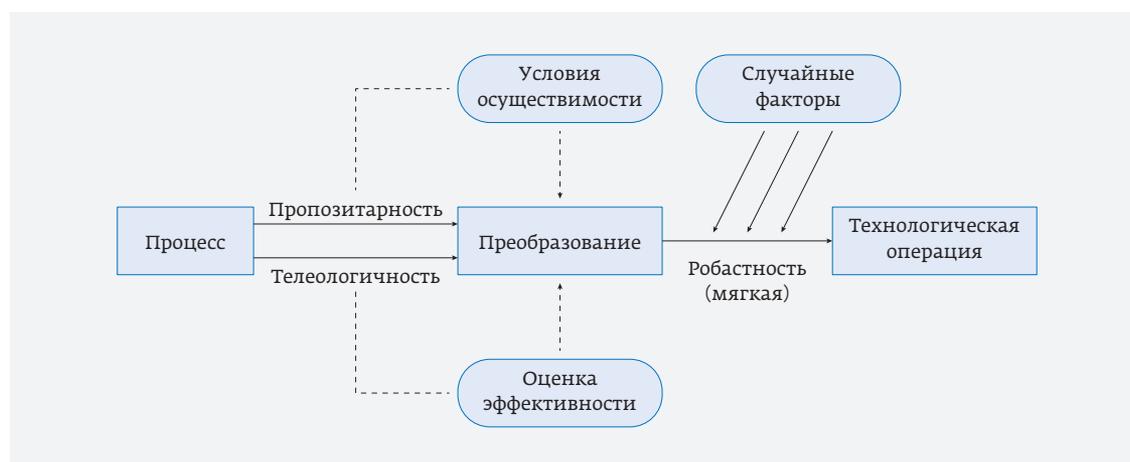


Рис. 6. ТО как результат расширения абстракции процесса свойствами пропозициональности, телеологичности и мягкой робастности

Ограничения:

- Ax_1 – непустоты входа-выхода и названия; непустота второго компонента подчеркивает искусственность преобразования $-(\forall x \in D_Oper)(pr_x \neq \emptyset) \quad i=1,2,3$
- Ax_2 – детерминированности – $T_Alter = \{D_Oper : (\forall y, z \in T_Alter)(pr_1y = pr_1z) \wedge (pr_3y = pr_3z)\}$
- Ax_3 – непустоты цели $-(\forall x \in D_Teleo)(pr_x \neq \emptyset) \quad i=1,2$

Дополнительные конструкции (термы):

- T_Alter – множество альтернатив – $T_Alter = \{D_Oper : (\forall y, z \in T_Alter)(pr_1y = pr_1z) \wedge (pr_3y = pr_3z)\}$

Телеологичность ТО наследуется от ТМ через состояние субстрата, поэтому нужно: во-первых, выделить из входа/выхода субстрат в явном виде, а во-вторых, выделить в цели (aim) относящееся к субстрату целевое состояние (goal). Такая спецификация, делая акцент на превращении субстрата, а не изменения, например, в оборудовании, утрачивает общность описания, но более полезна и служит мостиком к КС ТМ. Введением дополнительных элементов в КС «Абстрактное преобразование» получаем следующую КС (без учета группового характера ТО):

КС «Абстрактная ТО»

Дополнительные понятия:

- $Sbsts$ – множество состояний субстрата;
- $Tols$ – множество допусков;

Дополнительные отношения (структуры):

- D_Tols – в структуре перечисляются те субстраты, формализуемые как сочетание элементов, которые близки в смысле допусков – $D_Tols \in B(Sbsts \times Tols \times B(Sbsts))$
- $D_Scatter$ – каждой операции ставится в соответствие множество физически возможных состояний после её совершения $D_Scatter \in B(D_Oper \times B(Sbsts))$
- D_Goals – с целью операции ассоциировано целевое состояние субстрата и допуск – $D_Goals \in B(Aims \times Sbsts \times Tols)$

Дополнительные ограничения (аксиомы):

- Ax_4 – все поля структуры непустые, причем проколотых окрестностей не существует преобразования $-(\forall x \in D_Tols)(pr_x \neq \emptyset) \wedge (pr_1x \in pr_3x) \quad i=1,2,3$
- Ax_5 – детерминированности (функциональности): если выбрана центральная точка и допуск, то окрестность фиксирована; чем больше допуск (введем отношение порядка < на множестве $Tols$), тем шире окрестность – $(\forall x, y \in D_Tols)(pr_1x = pr_1y) \wedge ((pr_2x = pr_2y) \Rightarrow (x = y)) \wedge ((pr_2x < pr_2y) \Rightarrow (pr_3x \subseteq pr_3y))$
- Ax_6 – непустоты и функциональности: ТО однозначно задает разброс в конечном состо-

янии субстрата (проявляется сущность «серого ящика») $-(\forall x \in D_Scatter)(pr_x \neq \emptyset) \quad i=1,2$
 $(\forall x, y \in D_Scatter)(pr_x = pr_y) \Rightarrow (x = y)$

- Ax_7 – непустоты и функциональности: цель ТО необходимо предполагает целевое состояние субстрата и наличие допуска; если он не определен, ему присваивается произвольное значение, т. е. не пустое: $(\forall x \in D_Goals)(pr_x \neq \emptyset) \quad i=1,2,3$
 $(\forall x, y \in D_Goals)(pr_x = pr_y) \Rightarrow (x = y)$
- Ax_8 – полноты, связывающая D_Teleo и D_Goals : для каждой ТО заявленная цель соответствует фактической – $(\forall x \in D_Teleo)(\exists y \in D_Goals)(pr_y \in pr_x)$
- Ax_9 – полноты, связывающая D_Tols и D_Goals : для каждой ТО целевое состояние нам известно в смысле допусков – $(\forall x \in D_Goals)(\exists y \in D_Tols)((pr_1y = pr_2x) \wedge (pr_2y = pr_3x))$
- Ax_{10} – аксиома существования (технологичности): существует хотя бы одно физически достижимое конечное состояние субстрата, удовлетворяющее критериям допуска – $(\forall x \in D_Teleo)(\exists y \in D_Tols)$

$$\left(\left(\forall a \in pr_2x \right) \left(\exists z \in D_Goals \right) \left(\left(pr_1z = a \right) \wedge \left(pr_2z = pr_1y \right) \wedge \left(pr_3z = pr_2y \right) \right) \right) \wedge \left(\exists s \in Sbsts \right) \left(\left(s \in pr_3y \right) \Rightarrow \left(\exists t \in D_Scatter \right) \left(\left(pr_1t = pr_1x \right) \wedge \left(s \in pr_2t \right) \right) \right)$$

Дополнительные конструкции (термы):

- T_hitech – множество промышленных ТО, когда выход годных составляет 100%, то есть физический разброс параметров субстрата после ТО полностью укладывается в допуски; такая конструкция восполняет недостаток структуры ТО, отсутствующей в списке отношений, и вводится как множество кортежей, на каждый из которых накладывается модифицированная аксиома 10 –

$$T_hitech = \left\{ \left(x \in D_Teleo, y \in D_Tols, z \in D_Goals, t \in D_Scatter \right) : \left(pr_2t \subseteq pr_3y \right) \wedge \left(pr_1x = pr_1t \right) \wedge \left(pr_1z \in pr_2x \right) \wedge \left(pr_{2,3}z = pr_{1,2}y \right) \right\}$$

Остановимся на терме T_Alter КС «Абстрактное преобразование», разъясняющем понятие «технологическая альтернатива», когда в отношении субстрата производятся преобразования, имеющие идентичное начальное и близкое конечное состояние субстрата (или, по крайней мере, мишени), но разные способы осуществления. Знание множества технологических альтернатив, безусловно, полезно в изобретательской деятельности. В микроэлектронике много примеров альтернатив; приведем два: 1) нанесение слоя SiO_2 либо осаждением, либо тер-

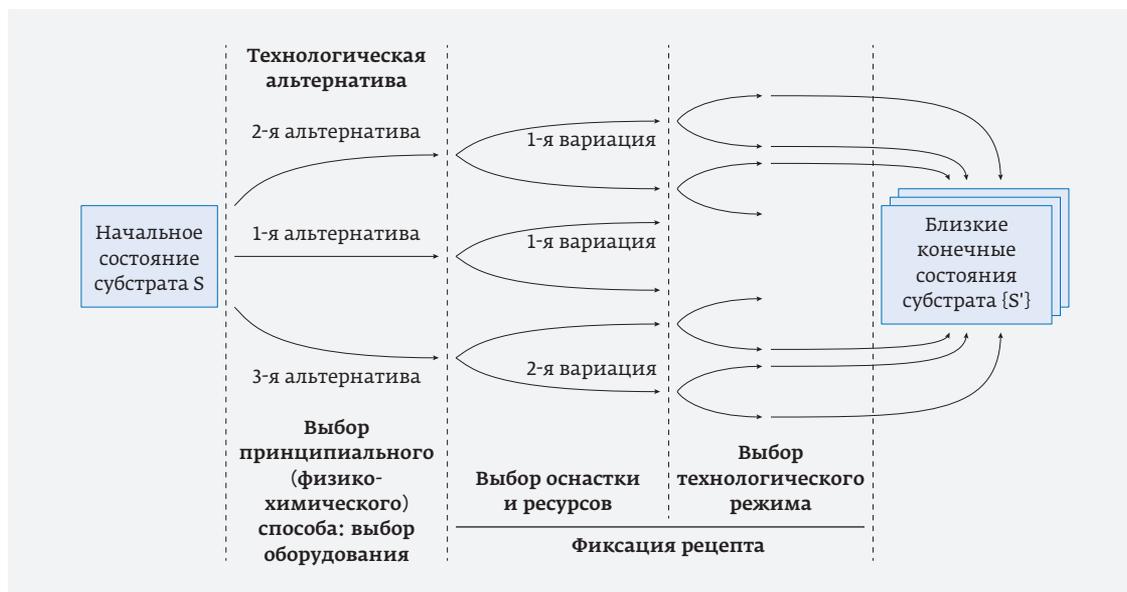


Рис. 7. Спецификация ТО при проектировании ТМ нового изделия через определение компонент ТО

мическим окислением, которое в свою очередь разделяется на влажное и сухое; 2) легирование области в полупроводнике либо методом диффузии, либо ионной имплантацией. Некоторые альтернативы могут отпасть, если мы лучше специфицируем результат преобразования. На рис. 7 выделены три смежных понятия: т. альтернатива → т. вариация → т. режим. Также фильтром на технологические альтернативы может выступать доступность и производительность оборудования (так, процессы электронно-лучевой литографии исследуются с 1970-х годов, но до 2015 года промышленного применения она не получила, несмотря на наличие электронно-лучевых установок).

КЛАССИФИКАЦИЯ ТО ПО ТРАНСПОРТНОМУ ПРИЗНАКУ. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ТО

Ранее мы в каждой из сфер выделяли транспортные технологии, связанные с доставкой (хранением) товаров в магазин (склад), переносом веществ по организму (классический пример – перенос кислорода гемоглобином), пассажиропотоком, доставкой электроэнергии и/или Интернет-сигнала конечному потребителю. Однако и в пределах одного предприятия есть потребность в переносе на более короткие расстояния: из цеха в цех (автокары), из одной супрамолекулярной структуры в другую – для биосистем. Это отражено на рис. 4. введением особой «транспортной ТО». Вместе с тем она достаточно автономна относительно ТМ; полуфабрикаты могут накапливаться и уже затем распределяться от разных ТМ, поэтому здесь связь скорее с уровнем ПП.

В любом случае к моменту совершения ТО все выходные и входные потоки М, Э, И должны быть обеспечены и согласованы. Для непрерывных ПП по типу конвейера или газомагистралей (субстрат не является твердым телом) выделение транспортных ТО, разнесенных во времени с обычной ТО, представляется спорным; транспорт и обработка здесь совмещены во времени.

Роторно-конвейерные линии [35,36], по аналогии с конвейерами Г. Форда, в СССР разрабатывались академиком Л. Н. Кошкиным и впервые внедрены для сборки крупнокалиберных патронов в 1938 году. Им же была предложена классификация ТО (в оригинальной версии: технологического оборудования) по транспортному признаку на четыре типа (его статья 1951 г. [37] до сих актуальна для ОТТ):

- **Класс I.** В этих операциях технологическая обработка массы происходит только после завершения транспортного процесса (подачи формы в рабочую зону) и наоборот, то есть один процесс прерывается другим. Это операции дискретного действия. Они-то как раз и характерны для микроэлектроники.
- **Класс II.** Для них характерно совпадение во времени транспортного и технологического процессов. Транспортный процесс непрерывен, а транспортная и технологическая скорости равны между собой. К такому оборудованию относят прокатные станы.
- **Класс III.** Эти операции отличаются взаимной независимостью транспортного и технологического процессов. Объекты обрабатываются при их непрерывном транспортирова-

нии совместно с рабочими органами через рабочую зону по какой-либо замкнутой траектории. Машины, созданные по этому принципу, получили название роторных, поскольку транспортный процесс первоначально был реализован как вращательное движение.

- **Класс IV.** Обработка осуществляется при массовом транспортировании объектов в произвольном положении через рабочую зону. Понятие «оборудование» заменяется понятием «рабочая среда». Она осуществляет технологическое воздействие непосредственно на весь поток, проходящий через рабочую зону. Если быть более точным, машины этого класса операций следует называть аппаратами (немеханическое воздействие на субстрат). Конституирующее свойство – пространственное воздействие на обрабатываемую деталь. Это процессы типа сушки, пропитки, закалки и т. п.

Стремление делать оборудование кластерным прослеживается в микроэлектронике особенно активно с 90-х годов прошлого века. Выгоды от этого очевидны – минимизация дефектности и длительности ТМ за счет оптимизации/ автоматизации транспортных операций. Заметим, что при производстве чипов по технологии 180 нм пластина проводит на маршруте в чистой комнате 2–3 мес. Одним из первых идею использования вакуумных систем замкнутого цикла для производства изделий микроэлектроники высказал в 70-х гг. XX в. В. А. Лабунов (так называемая «бочка Лабунова») [38].

Структура кластера позволяет оптимизировать и контрольно-измерительные процессы на уровне микроопераций и ТО (рис. 4). Для естественных технологий подобрать прямую аналогию сложно; возможно, функцию контроля берет на себя уровень какого-либо вещества в цитоплазме или физиологической жидкости или, для более сложных случаев, система ферментов или гормонов (так, например, существуют биохимические механизмы исправления ошибок при репликации ДНК). Для технологий социальной сферы все гораздо проще – экзамены и тесты являются органичной частью обучения. Поэтому мы вводим, помимо транспортного, еще один особый вид ТО – «Контрольно-измерительные и аттестационные ТО» (КИА ТО). Напомним, что аттестация объекта – это процедура установления степени соответствия реальных параметров объекта техническим требованиям к нему» [9].

Аттестационные ТО тесно связаны с ремонтно-профилактическими (регламентными) ТО. Если контрольно-измерительные ТО направлены на полу-

чение информации о состоянии субстрата, то аттестационные ассоциированы с получением информации о состоянии процессора (оборудования). Впрочем, аттестация в микроэлектронике применяется к процессам, оборудованию и, конечно, пластинам. Таким образом, при неразрушающем способе метрологии выходом КИА ТО является идентичное состояние субстрата / процессора плюс полученная информация, что подпадает под действие по крайней мере КС «Абстрактное преобразование». Тем не менее отчетливо выделяются два подтипа КИА ТО, заданные примерно формулами:

$$\langle S, A \rangle \rightarrow \langle S', A, I \rangle - \text{measuring works}$$

$$\langle \emptyset, Q \rangle \rightarrow \langle \emptyset, Q' \rangle - \text{preventive/repair works}$$

Здесь: апостроф ' – знак изменения состояния, S – субстрат, A – измерительное оборудование, Q – производственное оборудование, I – информация.

Для естественных технологий для организменного уровня «ремонтные работы» протекают полуавтоматически: за счет работы иммунитета и естественного обновления клеток (кстати, механизмы апоптоза, то есть программируемой клеточной смерти, до конца не изучены; между тем как, согласно Википедии, в организме среднестатистического взрослого человека в результате апоптоза погибает ежедневно порядка 50–70 млрд клеток, срок жизни эритроцита – 120 дней, а период полного обновления кожи – около месяца). В экономике предприятия заложены амортизационные отчисления для учета устаревания оборудования; при этом часто это устаревание искусственно в том смысле, что моральный износ случается раньше физического.

Уровень применения КИА в ТМ определяет близость технологии к статусу промышленной. В технологии микроэлектроники значение КИА ТО настолько велико, что идут на затраты в виде пластин-спутников (цена необработанной кремниевой пластины диаметром 200 мм электронного качества около 50–60 долл.) только ради информации о технологической операции. Некоторые КИА ТО могут быть не прописаны в маршрутной карте, в ТМ, но они обязательно *сопряжены*, ассоциированы с ТМ.

Для промышленной технологии роль КИА ТО заключается в оценке разбросов и потенциальной возможности управления, исходя из наблюдаемой статистики. Если КИА ТО мало, то есть потенциальная возможность пропустить фатальный сбой и, тем самым, допустить финансовый убыток. Таким образом, в промышленной технологии КИА ТО имеют

характер мониторинга. Согласно [39], «мониторинг – это постоянное систематическое наблюдение, сбор и упорядочение информации, необходимой для: а) изучения объекта, либо процесса; б) принятия решения о способах воздействия; в) предотвращения ухудшения обстановки и предупреждения об опасности». По Горневу Е. С. [9, с. 46], «Стадия промышленной технологии или поточно-массового производства не требует и даже отвергает попытки доводки параметров управления процессом. Качественное изделие создается, если с начала и до конца технологического процесса в него не вносятся никаких изменений или исправлений... В промышленном производстве процесс уже хорошо отлажен, а возникающие проблемы, как правило, носят катастро-

фический характер и могут вызвать остановку производства... Техпроцесс строго регламентирован. Каждому необходимо делать только то, что положено делать на основании информационных данных... В основу управления качеством положено управление производственными процессами. Качество заложено в процесс... В массовом производстве нет времени на обнаружение и отслеживание псевдодефектов. Здесь необходимы сканирующие системы большой производительности, использующие данные, сформированные более чувствительными и менее производительными системами».

Метрология (наука об измерениях) и диагностика могут рассматриваться, по нашей классификации, как частный случай информационных тех-

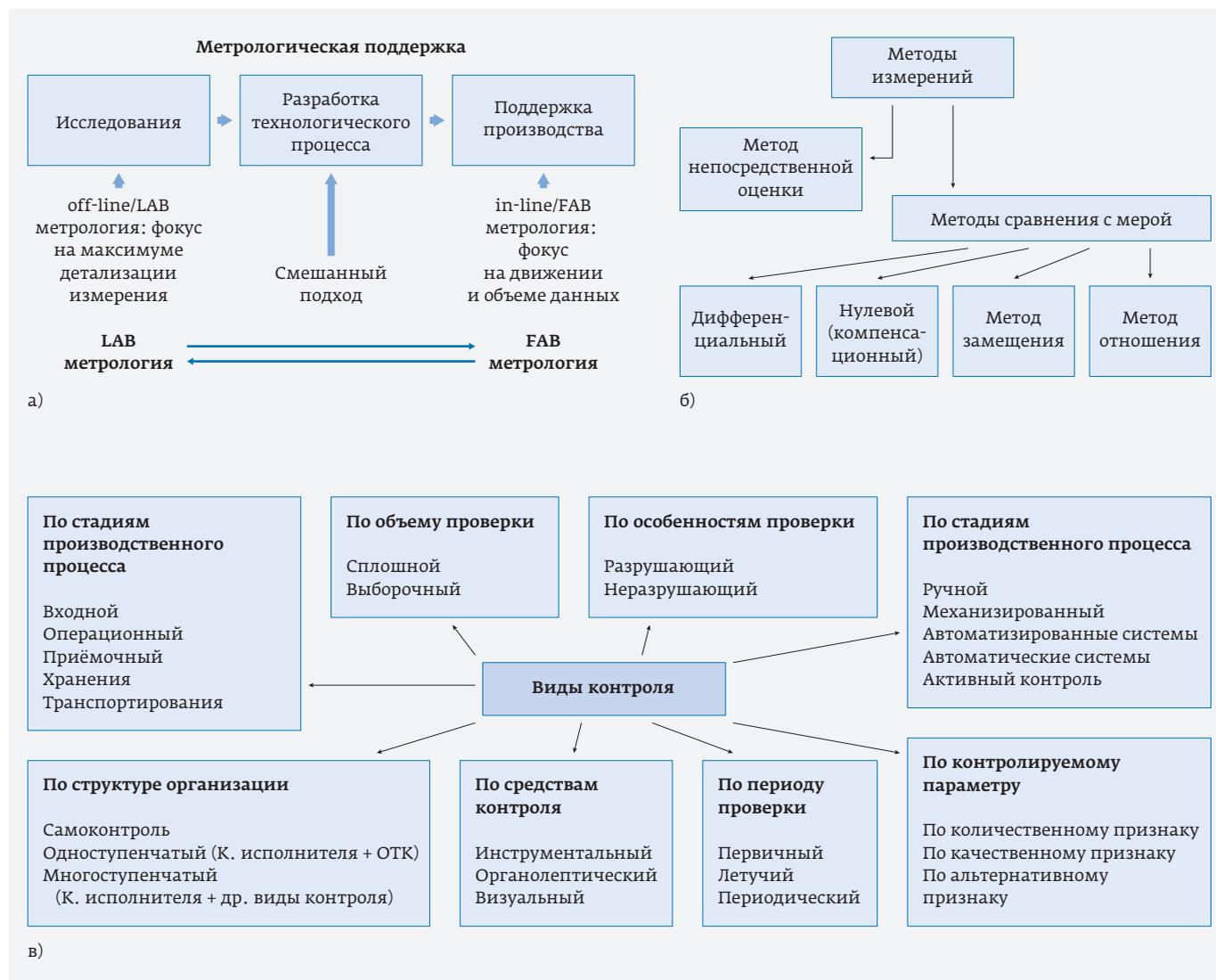


Рис. 8. Взаимосвязь FAB и LAB метрологий (а, [41]) и традиционные классификации измерений (б) и контроля (в)

нологий [40], представляющий собой мостик между материей и информацией (обычно информационные технологии имеют дело только с информацией, пусть и на материальном носителе). Традиционные классификации измерений в технике приведены на рис. 8; они могут быть перенесены в ОТТ без изменения. В любом измерении всегда, явно (калибровочные кривые) или неявно (при градуировке шкалы прибора), присутствует эталон/образец, а также, явно или неявно, подразумевается возможность многократных измерений. Наличие допусков и погрешности результата измерений вполне покрывается КС «Абстрактная ТО», где процессором является измерительное оборудование.

В простейшем случае это снятие непосредственных характеристик (например, при визуальном осмотре пластины через оптический микроскоп на предмет выявления дислокаций и других кристаллографических дефектов). В более сложных ситуациях важен вопрос обработки и интерпретации непосредственных данных с измерительного оборудования (КИО). Тогда КИА ТО превращается [42] в приложение информационной технологии к технологии микроэлектронике (см. «сопряжение технологий», по Миронову [43]). Интересно отметить, что существует различие в подходах в России и в США к проблеме определения критических размеров, неровностей края и шероховатостей при измерениях на растровом электронном микроскопе [44, 45].

Для производственных методов контроля по сравнению с лабораторными (FAB vs LAB metrology) накладываются дополнительные требования: высокая воспроизводимость, неразрушающий характер, высокая производительность, высокая степень автоматизации процесса измерения, а также расчета, безопасность для оператора и т. д. Это и составляет семантику термина «экспресс-контроль». Возникает возможность обратных и прямых связей; например, результат контроля критических размеров по резистивной маске может быть использован для корректировки режима последующей операции травления по этой маске. Такой подход позволяет получать прямые, релевантные данные о контролируемом процессе, а также позволяет снизить издержки производства, связанные с изготовлением дополнительных мониторинговых пластин или пластин-спутников специально для проведения контрольных операций. В нанoeлектронике необходим учет следующих факторов:

- изменения механических свойств объектов и структур при проведении контрольных опе-

раций, а также влияния поверхностей и границ разделов, изменения структурных свойств;

- повторный контроль параметров объектов и структур при проведении последующих операций;
- влияние диффузионных процессов, размытие границ раздела материалов;
- влияние приграничных областей наноразмерного объекта;
- снижение степени воздействия на образец при проведении контрольных мероприятий;
- повышение комплексности получаемого результата, в смысле увеличения числа одновременно определяемых параметров

Переход к использованию новых материалов и многослойных структур привел к тому, что толщины таких пленок исследуются сразу несколькими интерферометрическими методиками, которые комбинируются для получения результата. Это привело к появлению оптических установок для измерения толщин тонких пленок, обладающих множеством измерительных методик; например, установка ThermoWave OptiProbe, совмещающая сразу шесть интерферометрических методик в одном приборе. В этом приборе имеется рефлектометр, два спектрофотометра и три эллипсометра различных конструкций, что позволяет перекрыть большую часть потребностей в метрологии диэлектрических пленок в современном микроэлектронном производстве. Также, в программном обеспечении прибора предусмотрена возможность комбинирования нескольких методик при проведении измерения. При этом обратная задача решается по отношению сразу к нескольким наборам данных. В спецификациях приборов часто указывается параметр MAM (Measure and Move) Time – время, требуемое для перехода к следующей точке измерений на пластине; он составляет обычно 4–6 с при числе точек порядка 10 (на пластину). Обычно установки построены так, что первичный расчет предыдущей точки ведется, пока измеряется следующая точка. Для расчета нередко применяются специализированные платы с сигнальными процессорами, сконструированные под конкретную задачу. Вторичная обработка данных занимает большее время и зависит от быстродействия ЭВМ и сложности используемых алгоритмов.

Система контроля процессов нанотехнологии требует новых подходов, учитывающих изменения связанные с воздействиями используемых в измерительной методике зондирующих излучений. Характерный пример – эффект сгорания фоторезиста

под воздействием электронных пучков в растровых электронных микроскопах. Фокусированный ионный пучок может использоваться и как метод создания наноразмерных объектов, и как метод измерения [46, 47]. Те же авторы развивают гибридную методику, получившую распространение в 1990-х годах, для экспресс-контроля, которая базируется на взаимодополняющем (комплементарном) комбинировании измерительных методов, причем поиск решения ведется относительно нескольких наборов данных одновременно. Одна из идей гибридной методики заключается в том, что искомая величина определяется на основании не только измерения одним физическим методом, но и измерений несколькими физическими методами (для нанoeлектроники обычно рентгеновских и оптических), то есть де факто можно говорить об эволюции в сторону становления ТМ такой информационной технологии.

КЛАССИФИКАЦИИ ТО ПО ТИПУ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СУБСТРАТА. ПРИЛОЖЕНИЕ К МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Исходя из выявленных компонент ТО, двумя основными классификациями ТО будут классификация по способу самого преобразования (или воздействия на субстрат) или классификация по типу изменения в субстрате. Вначале опишем две достаточно детализированные спецификации, каждому типу ТО ставящие в соответствие условное графическое обозначение. Первая из них связана с именем немецкого профессора Рудольфа Коллера [48, 49], известного изобретателя по методу конструирования технических систем (1975) и по Фонду (справочнику) физико-технических эффектов. На основании потоковых представлений и дистинкции машин, аппаратов и приборов (как преобразователей потоков соответственно Э, М и И) он предложил свою систему элементарных операций, составляющую 12 (иногда дополняют [50] до 14) пар прямых и обратных операций (рис. 9).

Несмотря на то, что эта классификация непосредственно обращена к технике, а не технологии, следует принять ее к сведению, в частности, потому, что в информационных технологиях (проектирование или программирование), где преобразования ведутся над потоком данных, она вполне релевантна.

Другая классификация, взятая нами из [5, 50] (первоисточник не указывается), адаптирована для пищевой промышленности. Здесь выделяется 13 типов операций (рис. 10), а основная идея близка к коллеровской. Особенности этой классификации

проистекают от того, что субстрат находится в жидком или вязком состоянии. Подтипы 9–11 (рис. 10) свидетельствуют о том, что классификация смешанная, основанная и на типе самого воздействия, и на типе изменений в субстрате.

Третья классификация, представляющаяся нам более фундаментальной и связанная с субстратом, принадлежит Г. Я. Булатову и адаптирована им [51] к строительным технологиям. Автор пишет: «Итак, в обобщенном виде все технологии (а также и природные процессы) предлагается разделить на четыре класса:

- 1) технологии, приводящие к уменьшению материи в некотором наперед заданном (рассматриваемом) объеме пространства,
- 2) технологии, приводящие к ее возрастанию,
- 3) технологии, приводящие к преобразованию материи без существенного изменения ее количества,
- 4) технологии, обеспечивающие перенос (транспортирование) и сохранение (складирование) материи.

При этом под материей в широком смысле понимаются как вещества, так и поля, то есть масса, энергия, информация...». Примерами в строительстве являются для первого типа – демонтаж, черпание,

1. Выноска (источник)		Поглощение (место впадения)	
2. Проводимость		Изолирование	
3. Концентрация		Рассеивание	
4. Проведение		Непроведение	
5. Преобразование		Обратное преобразование	
6. Увеличение		Уменьшение	
7. Изменение направления		Изменение направления	
8. Выпрямление		Колебание	
9. Связь		Прерывание	
10. Соединение		Разъединение	
11. Сборка		Разделение	
12. Накопление		Расход	

Рис. 9. Классификация Р. Коллера преобразований в технических системах

бурение; для второго типа – монтаж, забивка, поглощение; для третьего типа – уплотнение, дробление, штамповка; для четвертого типа – доставка бетона (автобетоносмесители).

Предлагаемая нами классификация отталкивается от сложности структуры субстрата, его системности. Всякая система характеризуется элементами и связями, а ее модификация, неизбежная при любой ТО неспециального вида, может иметь следующие варианты:

- I. Изменение свойств элемента;
- II. Изменение свойств связи (или порядка связей);
- III. Добавление элемента;
- IV. Добавление подсистемы (сборка);
- V. Элиминация элемента (и связи с ним);
- VI. Массовое разрушение связей и разделение системы на подсистемы.

Для транспортных и КИА ТО добавляется VII тип – «Сохранение и стабилизация». Если ТО имеет сложный характер, то тогда эту классификацию лучше применить к микрооперациям. Достоинство данной, достаточно абстрактной классификации в том, что она, не добавляя ничего лишнего, исходит из первых принципов. Иными словами, мы утверждаем, что классификация является полной, и любое её усовершенствование сведется лишь к поиску под-

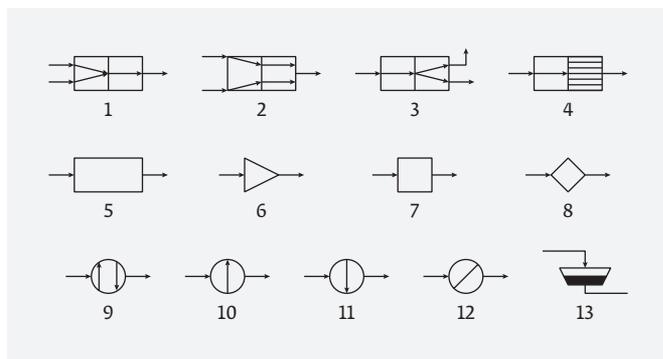


Рис. 10. Классификация ТО в пищевой промышленности. 1 – соединение без сохранения поверхности раздела (смешивание сред); 2 – соединение с сохранением поверхности раздела (образование слоя); 3 – разделение на фракции; 4 – измельчение; 5 – сложный процесс преобразования (комплекс физических, химических и микробиологических процессов); 6 – дозирование; 7 – формообразование; 8 – ориентирование (в частности, предметов); 9 – термостабилизация (поддержание постоянной температуры); 10 – нагревание; 11 – охлаждение; 12 – изменение агрегатного состояния; 13 – хранение

типов внутри одного типа или смешению типов внутри одной ТО. Например, тип III можно разбить на внешнее и внутреннее добавление; в последнем случае вспомним разделение однородной среды на фракции или твердофазную реакцию, приводящую к появлению новой фазы. Некоторая слабость данной классификации заключается в том, что изначальное выделение элементов несет в себе долю субъективности, особенно для жидких, коллоидных и других диспергированных сред, репрезентирующих субстрат.

Особенность технологий в сфере социума и образования связана с тем, что процессы забывания (V и даже VI типы) носят неуправляемый естественный характер, то есть, по сути, не являются технологичными. При этом умение забывать ставшие ненужными информацию или навык, по-видимому, является полезным. Генерация ассоциативных связей между изолированными кусочками знаний и навыков (чтобы сделать конструкцию жесткой и «незабываемой»), то есть ТО типа II, представляется основной целью образования.

Предложенная схема легко адаптируется к микроэлектронике. Такая адаптация включает в себя классификацию ТО микроэлектроники в редакции А. Г. Итальянцева (рис. 11), содержащей дальнейшее разделение на подтипы. Особенностью ТО в микроэлектронике, по-видимому, является отсутствие ТО II типа, что связано с твердотельностью субстрата. Пример ТО типа II в других технологиях: крепление подошвы в ботинке (либо клей, либо прошив, либо оба способа одновременно), крепеж деталей.

В микроэлектронике используются буферные слои, которые реализуют связывающие адгезионные, согласующие функции, но их при желании можно отнести к элементам субстрата. Хотя рис. 11 не исчерпывает все разновидности ТО в микроэлектронике, но обращает на себя внимание микрооперация «Совмещение» («Позиционирование») для ТО «Фотолиитография». По своему смыслу эта микрооперация относится к установу, но производится циклично, чередуясь с микрооперацией «Экспонирование», то есть явно принадлежит к ядру ТО. По своему смыслу эта микрооперация относится к установу, но требуемая ею точность выше «ювелирной»! Также некоторые затруднения при классификации доставляют микрооперации отмытки пластин (от пыли, от микрокусочков фоторезиста или стравленных веществ). Вероятно, их следует отнести, как и химико-механическую планаризацию, несмотря на формальное удаление материала, к типу I, т.е. модификации свойств элемен-

тов, если под элементом понимать «поверхность». Роль поверхностей резко возрастает при переходе от микро- к нанoeлектронике.

ТО, в которых предполагается проведение какой-либо твердофазной реакции, также представляют смешанный тип I+III: одновременно добавляется элемент (рождение фазы) и модифицируются свойства элементов (по крайней мере, двух, образующих вместе поверхность раздела). Под твердофазной реакцией мы понимаем, следуя [52], реакции, в которых один из реагентов и продукт химической реакции находятся в твердом состоянии, а второй реагент может быть в любом из четырех агрегатных состояний. В отличие от осаждения из парогазовой фазы (CVD) химическая реакция расходует материал не только границы раздела, но и всего объема приповерхностных областей. Ввиду важности реакций

такого типа мы выделили их в особый подтип, хотя, конечно, их можно отнести к методам непрямого формирования слоев.

Несколько слов о статусе фотолитографии, которая, бесспорно, является центральным звеном микроэлектронной технологии. Он менялся, и в настоящее время корректнее говорить о группе ТО «Перенос изображения». Ранее мы предлагали три критерия относимости физико-химических процессов к единой ТО (напомним, что в государственном стандарте такой критерий один – единство рабочего места, что, очевидно, не может быть формулировкой ОТТ):

- единство оборудования (как наследник прежнего критерия); проблема, тем не менее, в тенденции кластеризации оборудования;



Рис. 11. Общая классификация ТО, адаптированная к микроэлектронике и, в частности, к сложной операции фотолитографии (переноса изображения). MBE – молекулярно-лучевая эпитаксия, PVD – физическое осаждение из газовой фазы, CVD – химическое осаждение из газовой фазы, ALD – атомно-слоевое осаждение. ФР – фоторезист. Твердофазные реакции типа «жидкость – твердое тело» пока не внедрены в микроэлектронику, что отображено на схеме как «???». В схеме перечислены только основные технологические альтернативы

- единство во времени, то есть все процессы следуют один за другим непрерывно (но тогда возникает коллизия с технологическим микроциклом в составе ТМ или технологической линии);
- единство (законченность) преобразования субстрата; проблема, однако, состоит в размытости этой «законченности».

По третьему критерию все перечисленные на рис. 11 процессы являются микрооперациями в пределах ТО «Перенос изображения». По второму и, особенно, первому критерию лишь первые четыре являются микрооперациями, а последние два – самостоятельными ТО в микроцикле. Более того, для ситуации 1980 года по первому критерию корректнее было бы вынести первые две микрооперации в отдельную ТО III типа. Такая же ситуация возникает для DSA-литографии [53], где нет микрооперации «Экспонирование», которая заменена на низкотемпературный отжиг.

ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ТО МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Рассмотрим внутреннюю структуру ТО и ее эволюцию для некоторых ТО микроэлектроники. Начнем с фотолитографии, центральной операции [54] микроэлектроники.

Концептуализация переноса изображения, а также небольшой экскурс в историю, рассмотрен в [55], а на рис. 12. представлена эволюция некоторых ключевых параметров фотолитографии. С точки зрения прототипа любопытно подмеченное У. Моро соответствие процессов обработки красок и пленок резистов [54, ч. 1, с. 31].

Стоимость проведения фотолитографии составляет 1/3 общей стоимости изготовления микросхем. Стоимость установки экспонирования на длине волны 193 нм (сканера или степпера), которая [54] в 1970 году составляла 0,1 млн долл., в 1980 году – 1 млн долл., в 1990 году – 3 млн долл., а к настоящему времени составляет 1/2 всех расходов на фотолитографию и является ограничивающим фактором для внедрения новых резистов. Стоимость современного сканера под

проектные нормы 28 нм составляет 75 млн евро, а под проектные нормы 10–7 нм – больше 100 млн евро. Вес оптической части современных литографов превышает тонну (1 150 кг). Что касается нанесения резиста, то до начала 2000-х годов оно осуществлялось на отдельных установках (литографических трэках стоимостью от 3 до 12 млн долл.), но, начиная с установки ASML PAS5500 с полной автоматизацией, оно было совмещено с установкой экспонирования. Экспоненциальный рост стоимости фотолитографов привел к отсеву мелких производителей и формированию монополистического характера современного рынка (фирма ASML, табл. 3). Вообще же главными критериями выбора фотолитографа являются разрешающая способность (на оттестированных резистах), точность совмещения, производительность и глубина фокуса. Превышение числовой апертуры над единицей (рис. 12) связано с учетом показателя преломления света в иммерсионных системах.

Несмотря на то, что контактная фотолитография уже давно уступила место проекционной (основная причина – износ фотошаблона при контакте с пластиной, то есть деградация оснастки), тем не менее, до сих пор на рынке присутствуют установки контактной литографии (Canon FPA600), которая сохранила ограниченную область применения, например, в акустоэлектронике для ПАВ-сенсоров вплоть

Таблица 3. Стоимость сканеров и комплектов фотомасок для критических слоев для различных топологических норм [53]

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

до норм 0,25 мкм. Укажем на параллель из естественных технологий: хотя С4-путь фотосинтеза эволюционно прогрессивнее С3-альтернативы, но многие виды растений до сих пор его применяют.

В КМОП-технологии преимущественно применяются позитивные резисты, то есть при проявлении (оно всегда жидкостное) удаляется материал с экспонированных областей. Примечательно, что, несмотря на многообразие резистов, для их проявления используется универсальный растворитель – водный раствор 2-3% тетраметиламмония. В настоящее время вместо акриловых смол в качестве резиста используются фенолформальдегидные смолы (в органическом растворителе), что связано с уменьшением длины волны фотолитографии. Более 15 лет назад стали применяться резисты с химическим усилением (PCAR, Photo-sensitive

Chemically-Amplified Resists), что связано с методами литографии в глубоком ультрафиолете.

Очевидно, что уже достигнут предел оптической литографии на длине 193 нм, но две основные технологические альтернативы (EUV – ультрафиолетовая, EBЛ – электронным пучком) еще только находятся на стадии промышленного внедрения. Пока же приходится довольствоваться технологическими вариациями прежней – иммерсионная (где средой распространения света служит не воздух, а вода (жидкость), чтобы улучшить через изменение показателя преломления значение критерия Рэлея), мультипаттернирование («множественная» литография), тримминг (обрезание областей резиста травлением), применение фазосдвигающих фотошаблонов, внеосевое освещение (off-axis illumination), многослойные резистные стеки и др. приемы, являющиеся по сути дела

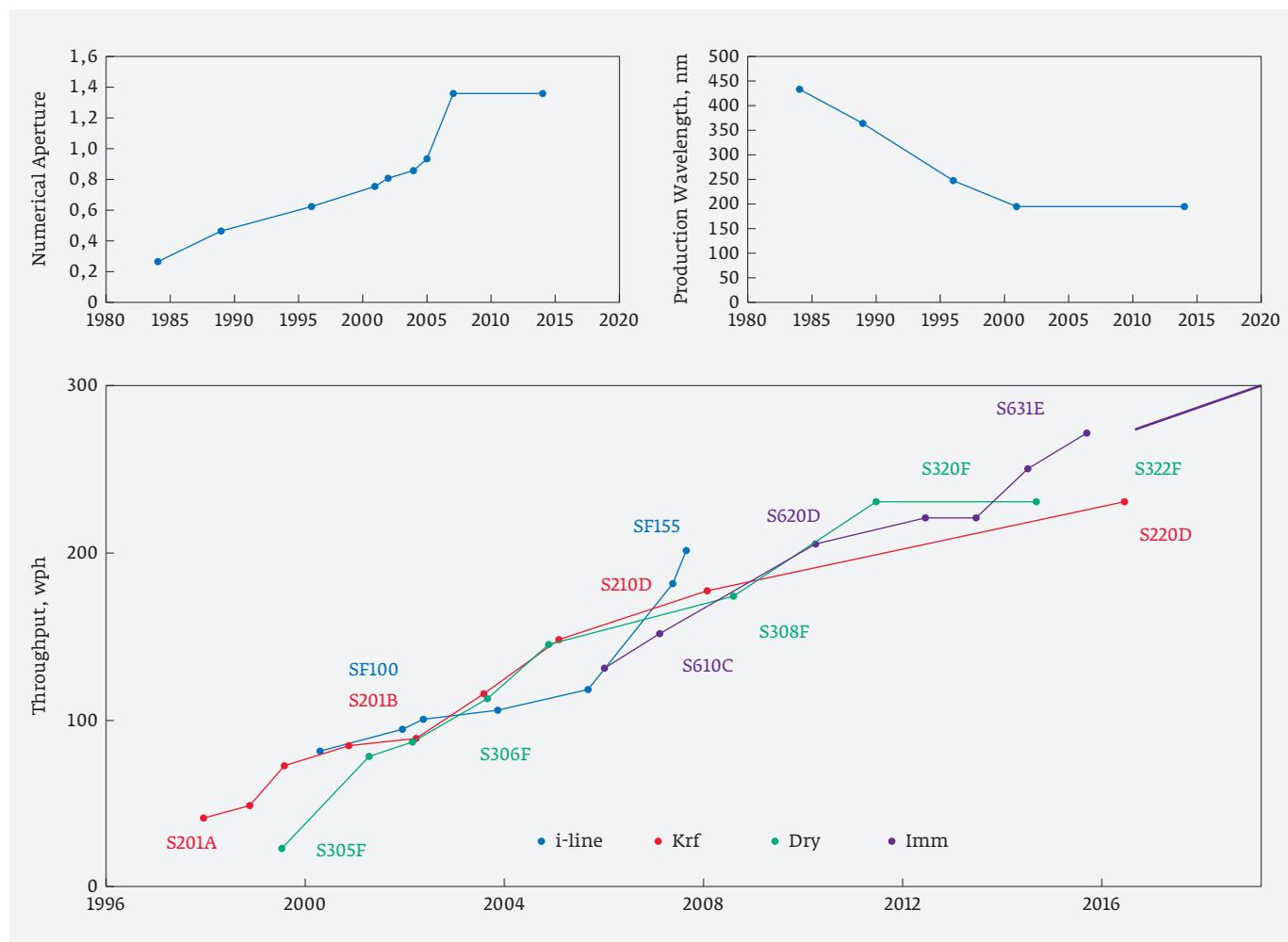


Рис. 12. Динамика изменения длины волны, числовой апертуры [56] и производительности [57]. Данные приведены для сканеров фирмы Nikon, рассчитанных на диаметр пластин 300 мм. I-line соответствует 193 нм. К 2026 году производительность должна вырасти до 400 пластин / ч

паллиативом. Кроме того, с уменьшением проектной нормы возникают эффекты оптической близости (из-за явления дифракции) и соответственно аппаратные и программные методы OPC (Optical Proximity Correction). Для ультрафиолетовой литографии в области проектных норм около 7 нм стохастические вариации состава фоторезиста суммируются со стохастическими вариациями числа падающих фотонов, разрушая «детерминизм» для минимальных размеров в R&D. Наиболее передовые экспонирующие EUV-установки от ASML не могут избежать этой проблемы без снижения производительности, тем самым увеличивая себестоимость производства. В сканерах нового поколения EUVL используется мембрана между пластинкой и оптикой, так что любые испарения с резиста не смогут загрязнить зеркала, что позволяет использовать заметно более широкий диапазон материалов в качестве резистов.

При переходе к EUV возникают новые вызовы:

- проекционная оптика не выдерживает столь жесткого излучения, поэтому для EUV-литографии необходима отражающая оптика (из-за этого числовая апертура EUV-сканеров равна 0,33, что гораздо меньше величины 1,35 для числовой апертуры иммерсионных сканеров) на многослойных зеркалах, что заметно сказывается на мощности достигающего пластины излучения вследствие неполного отражения. Также EUVL требует принципиально новых отражающих фотошаблонов;
- воздух непрозрачен для излучения 13,56 нм, из-за чего для экспонирования требуется вакуум;
- EUV-источник (на парах олова) является довольно грязным, поэтому (особенно учитывая необходимость поддержания вакуума) для оптики требуется дополнительная защитная пленка;

- требуется новая инфраструктура резистов для 13,56 нм;
- энергия одного фотона излучения 13,56 нм в 14 раз больше энергии фотона 193 нм. Значит, при той же дозе EUV-резисты будут поглощать в 14 раз меньше фотонов. Поэтому погрешность от статистической неопределенности резко возрастает (т. н. проблема стохастики);
- новые конструкции источника и оптики приводят к тому, что производительность EUV-сканера в разы ниже производительности сканеров ArFi.

Для электронной литографии проблемы, по-видимому, глубже; для достижения требуемой промышленностью производительности требуются по меньшей мере многолучевые (до 10 000 лучей) литографы и, соответственно, более интеллектуальное управление сканированием. Нельзя не признать общего вывода У. Моро, справедливого, пожалуй, для любой ТО: «Основной движущей силой микролитографии является взаимное влияние материалов, процессов и оборудования... В связи с этим качество резистного материала может быть оценено с трех различных точек зрения. Разработчик оборудования требует высокочувствительного резиста, обеспечивающего большую производительность. Разработчик материалов определяет качество резиста одним словом – стойкость (к плазме, высокой температуре, адгезионная стойкость). Разработчик технологии требует хорошей контролируемости размеров элементов, минимального ухода и разброса размеров рисунка, хорошего совмещения, нежестких допусков на параметры процесса». Эту цитату можно только дополнить, указав на важность моделирования и вспомнив термин computational lithography, появившийся в начале 1990-х годов.

Жидкостное травление применяется не только в группе операций переноса изображения, но на

Step information :

Step	Medium	Time [sec]	Speed [RPM]	Backflow	EPD used	WST	THK	SP1	SP2
1	medium 1 on	6.0	1100	TANK	No	No	No	-80.00	79.90
2	medium 1 off	2	2000	TANK	No	No	No	-20.00	20.00
3	DI on	10.0	500	DRAIN	No	No	No	0.00	0.00
4	N2 DRY	0.0	1500	DRAIN	No	No	No	0.00	0.00

Speed in RPM and time in seconds

Рис. 13. Один из рецептов (4 микрооперации) для травления 300-нм слоя SiO₂ с обратной стороны пластины. Medium 1: HF 49%, 60 °C; DI – деионизованная вода, N2 dry – сушка в азоте, RPM – rotation per minute, отрицательные числа относятся к координатам сопла, откуда подаются реагенты

Таблица 4. Эволюция жидкостных процессов в микроэлектронике

Декада	Ключевые изобретения
1970–1980	Начало использования жидкостной химической очистки поверхности RCA, разработанной В. Керном и Д. Путиненом в лабораториях фирмы Radio Corporation of America Шаг 1 (SC-1): $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} 1 : 1 : 5$, $T = 70\text{--}80^\circ\text{C}$. Время погружения ~10 мин Шаг 2 (SC-2): $\text{HCl} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} 1 : 1 : 5$. $T = 70\text{--}80^\circ\text{C}$. Время погружения ~10 мин
	Очистки, основанные на RCA: Шаг 1. серно-перекисный раствор (КАРО) Шаг 2. SC-1 + SC-2 Шаг 3. HF водный раствор Шаг 4. Сушка центрифугированием
	Метод обротки платин струей жидкости при вращении (первый автоматический спрей-процессор компании FSI). Отдельные химреактивы подаются в смесительные коллекторы, откуда смеси SC-1, SC-2 и деионизованная вода (ДВ), разбиваемые на струи, подаются напрямую на вращающиеся пластины
	Начало использования мегазвуковой обработки [58] для удаления микрочастиц жидкостным способом (разработка лаборатории RCA). Во время обработки в SC-1 генерируются акустические волны частотой 850–900 кГц и плотностью мощности 5–10 Вт/см ² для эффективного удаления микрочастиц вплоть до 0.3 мкм включительно
1980–1990	Разбавленные SC-1 и SC-2 растворы [59] при RCA-очистке в погружных ваннах для групповых обработок пластин
	Очистка разбавленными химреактивами с рециркуляцией и фильтрацией [60] (dilute dynamic clean, DDC), разработанная в исследовательском центре LETI для групповых обработок пластин в погружных ваннах
	Универсальные ванны для проведения всех процессов очистки в полном потоке при нахождении пластин в стационарном состоянии и последовательной подачи химреактивов в ванну для очистки, промывки и сушки (CFM Technologies Inc.). Ёмкость, вмещающая пластины, контролируется с помощью гидравлических устройств, позволяющих удалять горячие или холодные отработанные растворы, включая SC-1 и SC-2 с последовательной и постоянной подачей сверху свежих сред на неподвижные пластины, размещенные в кассетах
	Введение травления оксида кремния в парах плавиковой кислоты (FSI и Texas Instruments). Обработка при комнатной температуре и нормальном давлении, система для индивидуальной обработки пластин обеспечивает управление смешиванием безводной HF и паров H ₂ O перед входом в процессную камеру, используя программируемый регулятор расхода газов (РРГ)
	Использование сухого льда для удаления микрочастиц с гидрофобных поверхностей. Чистый жидкий углекислый газ (CO ₂) из емкости при подаче принимает форму сухого ледяного снега, продуваемого через пластину
Начало исследований процессов жидкостной химической очистки – первые научные осмысления базовых процессов жидкостной очистки [61]	

Таблица 4. Продолжение

Декада	Ключевые изобретения
1990–2000	Очистки, основанные на использовании озона: очистка IMEC; очистка Ohmi (ДВ/О ₃ – HF + NH ₄ OH – HF / H ₂ O ₂ – сушка). Здесь с помощью HF удаляется химический окисел с инкорпорированными в нём микрочастицами, а NH ₄ OH способствует удалению частиц в виде оксидов металлов, например, Al ₂ O ₃ .
	Настойчивые попытки полностью заменить процессы жидкостной химической обработки сухими процессами травления и очистки
	Представление процесса индивидуальной жидкостной очистки пластин (фирма SEZ) Уменьшение количества используемых химреактивов и деионизованной воды при сохранении качества очистки. Например: сокращенная очистка IMEC с использованием озона: ДВ/О ₃ – HF/HCl – ДВ/О ₃ – сушка Марангони
2000–2010	Уменьшение времени цикла обработки. Использование индивидуальной обработки пластин для критических очисток: ДВ/О ₃ – HF – сушка в парах изопропилового спирта
	Уменьшение загрязнения поверхности металлическими примесями и влияния окружающей среды
	Повышение производительности Появление специализированных химреактивов (в большинстве применений для цикла формирования металлизации / 3D интеграции): удаление фоторезиста, травление затравочного слоя Si, удаление полимерных остатков после плазмохимического травления
2010 – наст. время	Повышение количества шагов жидкостной химической очистки
	Внедрение новых жидкостных процессов, специализированных для ТО микроэлектроники: очистки после химико-механической полировки (ХМП), очистки перед осаждением атомных слоев материалов (АСО), очистки для иммерсионной литографии

протяжении всего ТМ, несмотря на конкуренцию со стороны сухого травления. Примечательно, что, имея в виду единство оборудования, жидкостное травление есть частный случай жидкостной химической обработки (ЖХО) пластин (см. табл. 4). Операция сохраняет неэлементарный (рис. 13) характер, аналогично устаревшему примеру рис. 2.

В современной технологии микроэлектроники жидкостным способом в основном травится оксид кремния различного происхождения, нитрид кремния, поликремний. Выбор травителя зависит от того, какие требования к подготовке поверхности предъявляет следующая ТО в ТМ. Даже при выбранной технологической вариации (в данном случае выбор «травителя – травимое») необходимо специфицировать технологический режим, так как в разных условиях в одних и тех же травителях слой может как травиться, так и осаждаться.

Интерес к разбавленным растворам в 80-х годах, вполне подпадающий под закон повышающейся эффективности (Утверждение 2), имеет разную этиологию. Во-первых, с развитием технологии пластины сами по себе стали чище, что позволило использовать разбавленные растворы. Во-вторых, требование уменьшения потери кремния в приборном слое с ужесточением технологических норм. В-третьих, появление различных способов интенсификации процесса: повышение температуры, использование мегазвуковых волн, применение поверхностно-активных веществ.

Металлические загрязнения повреждают поверхность пластин, приводя к образованию ямок травления, особенно в HF, могут влиять на электрические характеристики приборов, приводить к появлению подвижных зарядов, влияющих на надежность оксида кремния; органические загрязнения могут

влиять на напряжение пробоя транзисторов, оказывать влияние на оптическую толщину пленок, приводя к некорректным измерениям, менять состояние поверхности пластины, остатки углерода оказывают влияние на CVD-процессы и т. д. В оборудовании установлены воздушные, водяные и фильтры для химических реактивов. Фильтры могут засоряться и быть сами источниками загрязнений. Загрязнения могут поступать из самого оборудования: от клапанов, насосов, различного вида соединений, трубопроводов, движущихся механических частей; от операторов, которые производят манипуляции с пластинами, и т. д. Таким образом, само оборудование может являться источником загрязнений, несмотря на проводимые ремонтно-профилактические работы, и дает неустраняемый эффект стохастичности ТО.

Несколько слов о групповой и индивидуальной обработке пластин. Очевидно, что первый способ дает экономию времени, повышая производительность, и энергии, но второй – обеспечивает лучшую точность и воспроизводимость. Оба фактора действуют в противоположных направлениях, и результат их взаимодействия неочевиден. За исключением диффузионных ТО и ~50% ЖХО уже сейчас все ТО на пластинах диаметра 200 мм реализуются на установках индивидуальной обработки пластин. Вероятно, что для диаметра 450 мм будет только индивидуальная обработка.

Рассмотрим ТО «Ионная имплантация» (ИИ). По Д. И. Тетельбауму [62], «Историю развития ИИ как науки и технологического метода можно разделить на 3 этапа: 1961–1975 годы; 1975–1990 годы; с 1990 годы (этот период еще не закончился). Разумеется, это деление условно; тем не менее, довольно четко прослеживается изменение характера исследований на рубежах указанных периодов. В самый ранний период ИИ была объектом больших ожиданий для энтузиастов-пионеров и одновременно встречала скептическое отношение со стороны многих ведущих специалистов в области микроэлектроники и физики полупроводников. Ибо уже тогда были понятны несомненные преимущества метода, но очень серьезной проблемой представлялись возникающие при ИИ радиационные дефекты: на каждый внедренный атом примеси при типичных энергиях ионов создаются сотни и тысячи смещенных атомов. Однако уже через несколько лет, к началу 70-х годов, сомнения были развеяны. Информационный взрыв в области ИИ, последовавший в этот период, ясно показал, что дефекты не являются препятствием для легирования полупроводников и соз-

дания p-n переходов. За весьма короткий срок ИИ была внедрена в промышленность и заняла господствующее место в технологии производства кремниевых интегральных схем, вытеснив метод диффузии. Заметим, что это место она занимает и поныне; по всей вероятности, оно сохранится и в обозримом будущем... Многие зарубежные фирмы разрабатывают все более изощренные технологические методы ИИ, такие как иммерсионная, «душевая» (от слова «душ») имплантация, а теперь и «поштучная» прицельная... Помимо имплантации традиционных примесей (бор, фосфор и т. д.), ставшая промышленной в конце 70-х годов, получила развитие SIMOX-технология (Separation by IMplantation of OXygen), где высоколегированные кислородом области создавались путем ИИ. Обычно после основного процесса имплантации совершается термический или лазерный отжиг при температурах около 400–500 °С для восстановления кристаллической решетки.

Первый коммерческий имплантер появился в 1965 году (Peter H. Rose, NV10 [63]), хотя само явление было обнаружено в 1952 году (R. Ohl). Ионные имплантеры, представленные на рынке, можно разбить на три группы согласно их применению: с высокими ионными токами, со средними токами и с высокими энергиями. Для применений, где требуются высокие дозы имплантации, чем больше ионный ток, тем процесс имплантации происходит быстрее, соответственно производительность установки выше. Ионные токи таких процессов могут достигать порядка 25 мА. Производители оборудования затратили большие усилия на максимизацию ионных токов, особенно для небольших энергий ионов. И хотя имплантеры с высокими токами могут генерировать пучки ионов с токами и в области 10 мкА нестабильности ионных источников не дают возможности для применения таких токов для небольших доз. Короткие линии пробега ионов таких установок позволяют им работать в области энергий от 1 до 100–200 кэВ. Установки ионной имплантации на средних токах созданы для максимизации однородности доз и повторяемости. Это основные «рабочие лошади» производителей микрочипов. Их ионные токи находятся в области от 1 мкА до 5 мА и энергии ионов лежат в пределах 5–600 кэВ. Оконечные секции таких установок, где происходит столкновение ионов с подложкой дают возможность имплантации под углами вплоть до 60° от нормали к поверхности подложки. Современный имплантер может стоить порядка 2–5 млн долл. США, в зависимости от модели и размеров обрабатываемых подложек. Инженерам также надо поработать

над задачами дальнейшего уменьшения загрязнений, связанных с процессами имплантации. Атомы предварительно имплантированных элементов при последующей имплантации могут быть выбиты на поверхность подложки (перекрестное-загрязнение) или возможно имплантация ионов нужных элементов, но с неправильной энергией или зарядом (энергетическое загрязнение). На поверхность подложки возможно осаждение частиц привнесенных туда либо пучком ионов или при неправильном обращении с подложкой.

В табл. 5 приведена эволюция линейки EXCEED имплантеров корпорации Nissin Ion Equipment на промежутке 1994–2016 годов.

Эволюция отдельной ТО не ограничивается инструментом, рабочими переходами (микрооперациями), методами контроля и т. п. Из различных операций она создает в свою очередь более сложную структуру, формируя некий модуль с обратными связями и заданным алгоритмом работы. Одновременно происходит автоматизация, усложнение самой ТО (расширение списка управляемых параметров), при этом баланс между специализацией и универсальностью оборудования, а также групповыми и индивидуальными способами обработки является динамическим. Эволюция отдельной ТО попадает в зависимость от развития смежных ТО и ТМ в целом, то есть имеет место феномен коэволюции.

КЛЮЧЕВЫЕ ПОНЯТИЯ УРОВНЯ ТО

Мы не стали приводить концептуальную схему для покомпонентного описания ТО, поскольку она отличается от КС «Абстрактная ТО» лишь спецификацией «входа» и выделением из условий ТО в отдельное множество управляющих рецептов (и / или альтернатив). Это лишь усложнило бы схему без существенных принципиальных изменений. Приведем еще раз список введенных нами понятий, возникающих на уровне ТО (вместе с определениями):

1. Субстрат (или несколько субстратов) – компонент «входа» и / или «выхода» ТО, обычно пассивно участвующий в преобразовании и носитель свойства телеологичности ТО;
2. Мишень преобразования – выделяемая по какому-то критерию подсистема субстрата, изменения которой в ходе ТО целенаправленны (желательны);
3. Целевое состояние субстрата – желаемое состояние субстрата после совершения ТО, представляемое точкой в фазовом пространстве;
4. Процессор – неуничтожимый компонент «входа» и «выхода» ТО, активно участвующий в преобразовании и не являющийся носителем свойства телеологичности ТО;
5. Оборудование и оснастка – подсистемы процессора, незаменимая и заменяемая в различных реализациях ТО;
6. Ресурсы – компоненты «входа» и «выхода» ТО, необратимым образом расходующиеся или получаемые в ходе ТО;
7. Эссенциальный фактор – ключевое, наиболее важное условие, ассоциированное, скорее, со сферой применения технологии, чем с ТО;
8. Технэ уровня ТО – информация, на основании которой управляют проведением ТО и задаваемая порядком следования микроопераций (со своими спецификациями) и спецификацией альтернативы, вариации, режима;
9. Микрооперация – временная часть ТО, характеризующаяся определенной пространственной конфигурацией процессора, субстрата и ресурсов;
10. Технологическая альтернатива – способ проведения ТО при известном начальном и целевом состоянии субстрата и выбранной единице оборудования;
11. Технологическая вариация – способ реализации технологической альтернативы при выбранной оснастке;
12. Технологический режим – способ реализации технологической вариации при выбранном рецепте, регламентирующем взаимодействие процессора, субстрата и ресурсов;
13. Допуск – мера различия желаемого и допустимого состояний субстрата после совершения ТО;
14. Технологическая среда – компонента ТО, снижающая степень неопределенности ТО за счет подавления внешних воздействий на процессор;
15. Транспортная операция (микрооперация) – специальная ТО, результатом которой выступает перемещение субстрата (субстратов) в нужную точку пространства (или хранение) без изменения свойств субстрата;
16. Контрольно-измерительная и аттестационная операция (микрооперация) – специальная ТО, телеология которой заключается в получении информации о субстрате (субстратах);
17. Ремонтно-профилактическая ТО – специальная ТО, где оборудование или его часть одновременно являются и субстратом, и процес-

Таблица 5. Эволюция имплантеров EXCEED фирмы Nissin [64]

Year of Production	'94	'95	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16			
Tech. Node DRAM 1/2 Pitch (nm)	240	210	190	165	150	140	135	130	115	100	90	80	70	65	57	50										
EXCEED2000/2000A/2000AH		2000		EXCEED 2000A / 2000AH																						
EXCEED2300H/2300AH							2300H		AH																	
EXCEED2300V/2300V<G1> ><G2>								2300V		2300AV		2300AV<G2>														
EXCEED3000AH<G1> ><G2>/Evolution												G1	3000AH<G2>			EXCEED3000AH-EVO										
EXCEED9600A/Evolution														EXCEED9600A		EXCEED9600A-EVO										
EXCEED Productivity	Wafer Size	200mmφ					300mmφ										450mmφ									
	Mechanical Throughput	200wf/H					220wf/H		300wf/H		360		450wf/H													
	Beam Current: B+	250 uA @ 10keV					250 uA @ 10keV					1200 uA @ 10keV														
	Beam Current: As+	400 uA @ 20keV					500 uA @ 20keV					500 uA @ 20keV														
	Beam Current: B++	40 puA @ 500keV					30 puA					250 puA														
	Beam Current: P+++	15 puA @ 600keV					15 puA					85 puA														
	Min. Energy	10 keV					5 keV					3 keV														
	Max. Energy	400 keV					750 keV					960 keV														
	Ion Source Type	Bernas					Advanced Bernas (BEAR)					IHC type (IHC-R2)														
	Set Up Time	6 min					4.5 min		3.5 min		3.0 min			2.5 min												
Maintenance Time (I/S Life Time)	200H					400H					700H															
EXCEED Precision	Indium						Indium-																			
	Energy Contamination	Final Energy Magnet-																								
	Particle Contamination	Conductive-Peek Wafer Holder -																								
	Metal Contamination	Metal Free Cover -																								
	Uniformity	1D-2L			2D-2L			2D-3L Faraday System -																		
	Parallelism / Beam Divergence																						X-Y monitor	Vertical Lens Feedback Control System		
	Tilt/Twist Angle Accuracy																							Wafer Angle Feedback Control System		
	Charge Compensation					Filament PFG			RF-PFG									N-PFG								
Patterning Implantation (PI System)																						PI System				

Примечание: Mechanical Throughput – производительность (в пластин / ч), Maintenance Time – продолжительность технической поддержки

сором, а телеология заключается в восстановлении свойств оборудования.

Сформулируем синтетическое определение ТО, исходя из всего вышесказанного; оно, конечно, не претендует на окончательный характер. Технологическая операция – это единое, обычно неэлементарное и многостадийное, но непрерывное во времени, эффективное вза-

имодействие субстрата, процессора и ресурсов, происходящее под управлением внутренней информации и являющееся процессом с выраженными свойствами системности, целенаправленности и воспроизводимости, вместе с условиями его осуществления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В контексте построения ОТГ проведен концептуальный анализ уровня технологической операции, начиная от фундаментальных понятий процесса и преобразования. Впервые введены понятия мишени преобразования, технологической среды и триады «альтернатива, вариация, режима», репрезентирующих более общее понятие «технэ» на уровне ТО. Получили более четкое, чем ранее, оформление понятия микрооперации, а также классификация ТО по признаку вида изменения субстрата. Несмотря на общий характер 17 введенных понятий, прослежены примеры их семантической связи в области микроэлектроники. Сделана попытка обобщить опыт эволюции некоторых ТО микроэлектроники (фотолитография, жидкостная химическая обработка, ионная имплантация) за ее историю, в частности, перехода в стадию промышленной технологии.

ПРИЗНАТЕЛЬНОСТЬ

Авторы выражают благодарность за предоставленную информацию и консультации сотрудникам АО «НИИМЭ» и завода «Микрон»: д. ф.-м. н. А. Г. Итальянцеву, к. х. н. И. В. Кирюшиной, ведущему специалисту в области литографии О. П. Гущину, а также ведущему инженеру АО «Ангстрем-Т» к. т. н. А. Д. Волоховскому.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горохов В. Г.** Основы философии техники и технических наук. – М.: Гардарики, 2007.
2. **Горохов В. Г.** Технические науки: история и теория (история науки с философской точки зрения): монография. – М.: Логос, 2012. 512 с.
3. **Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В.** Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника 2017. № 4 (168). С. 16–41.
4. **Черкасов Г. Н.** Научная организация труда: цели, содержание, методы. – М.: Профиздат, 1967.
5. **Богданов В. Д., Дацун В. М., Ефимова М. В.** Общие принципы переработки сырья и введение в технологии производства продуктов питания: Учебное пособие. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. 213 с.
6. **Романенко В. Н., Никитина Г. В.** Общие технологии. – СПб: Изд. ИВЭСЭП, 2011. 277 с.
7. **Горнев Е. С.** Оказание технической помощи предприятиям, осваивающим производство ИТС.: научн. техн. отчет по ОКР «Индустрия» / НИИМЭ, гос. рег. № Ф 01187. – М., 1972. 48с.
8. **Самойлов В. Н.** Разработка технологии системного моделирования для сложных развивающихся технологических процессов // Автореферат дисс. на соиск. на уч. степ. канд. техн. наук. по спец. 05.13.16. – Дубна, 1997. 23 с.
9. **Горнев Е. С.** Разработка и внедрение промышленной субмикронной технологии СБИС // Диссертация на соиск. уч. степени док. тех. наук по спец.: 05.27.01. – М., 2000. 487 с.
10. **МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ ГОСТ 3.1109-82.** – М.: Стандартинформ, 2012.
11. Руководство пользователя SprutCAM 11. Режим доступа: https://www.sprut.ru/files/SprutCAM11/documentation/index.html?html__277.htm Дата обращения: 30.07.2018.
12. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 56662-2015 / ISO / TS80004-8: 2013. Нанотехнологии: Часть 8: Процессы нанотехнологического производства. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. С. 35.
13. **Симонов Б. М., Заводян А. В.** Технологические основы микроэлектроники / Под ред. С. П. Тимошенко; Учебное пособие в 2-х частях. – М.: МИЭТ. Ч. 1, 2008. 160 с.; Ч. 2, 2009. 156 с.
14. **Karttunen J., Kiihamäki J., Franssila S.** Loading effects in deep silicon etching // Proceedings of SPIE. 2000. Vol. 4174. PP. 90–97.
15. **Turchin V. F.** The Cybernetic Ontology of Actions // Kybernetes. 1993. Vol. 22 (No. 2). PP. 10–30.
16. **Найханова Л. В.** Технология создания методов автоматического построения онтологий с применением генетического и автоматного программирования. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2008. 244 с.
17. **Андреев Д. А., Воронов М. В.** Метод построения онтологии технологических действий // Вестник СГТУ. 2012. № 1 (67). С. 160–168. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-postroeniya-ontologii-tehnologicheskikh-deystviy> Дата обращения: 15.05.2018.
18. **Хубка В.** Теория технических систем / Пер. с нем., 2-е изд. – М.: Мир, 1987. 208 с.
19. **Долгий Н. А.** Операторная модель поточной линии производства консервов из обжаренной рыбы // Известия КГТУ. 2012. № 27. С. 69–73.
20. **Денисов А. В., Коноплева И. А., Хохлова О. Д.** Информационные технологии: эл. книга /

- Национальный Открытый университет «ИНТУИТ». Режим доступа: https://www.intuit.ru/goods_store/ebooks/9967 Дата обращения: 30.07.2018.
21. **Вендров А. М.** CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. – М.: Финансы и статистика, 1998. 98 с.
 22. **Хотяшов Э. Н.** Проектирование машинной обработки экономической информации: Учебник. – М.: Финансы и статистика, 1987. 248 с.
 23. Основы общей теории технологий: конспект лекций. – Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. Режим доступа: edu.vgasu.vpn.ru Дата обращения: 30.07.2018.
 24. **Лазарев В. Л.** Робастное управление в биотехнологической промышленности: Учеб. Пособие. – СПб.: Университет ИТМО; ИХиБТ, 2015. 196 с.
 25. **Kales P.** Reliability: For Technology, Engineering, and Management. – Prentice Hall, 1998. 392 p.
 26. **Панфилов В. А.** Технологические линии пищевых производств (теория технологического потока). – М.: Колос, 1993. 288 с.
 27. **Ефимов А.** Поточковый анализ технологических операций. Режим доступа: <http://www.metodolog.ru/01463/01463.html> Дата обращения: 15.05.2018.
 28. **Марка Д. А., МакГоуэн К.** Методология структурного анализа и проектирования SADT. – М.: Мета-Технология, 1993. 231 с.
 29. Руководство по IDEF. Режим доступа: <http://www.staratel.com/iso/IDEF/IDEF3/Iddef3.pdf> Дата обращения: 30.07.2018.
 30. **Ляпунов А. А.** R-множества // Тр. МИАН СССР. 1953. Т. 40. С. 3–68.
 31. **Ляпунов А. А.** О логических схемах программ / Всесоюзный съезд математиков, 3-й, Москва, июнь-июль 1956 г.: труды. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1956. – Т. 1: Секционные доклады. С. 193–195.
 32. **Марков А. А.** Теория алгорифмов. – М.-Л.: изд-во АН СССР, 1954. 376 с.
 33. **Марков А. А., Нагорный Н. М.** Теория алгорифмов. – М.: Наука, 1984. 432 с.
 34. **Матюшкин И. В.** Математическое моделирование технологических процессов на примере автоэпитаксии кремния // Диссертация на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук по спец. 05.13. 18. – Долгопрудный, 2000. 107 с.
 35. **Кошкин Л. Н.** Комплексная автоматизация производства на базе роторных линий / Изд. 2-е, переработанное и дополненное. – М.: Машиностроение, 1972. 354 с.
 36. **Ермаков Ю.** Мы победили в битве умов // Техника – молодежи. 2000. № 6. Режим доступа: <http://tmru.friendlywebshop.com/200006/p18.html> Дата обращения: 30.07.2018.
 37. **Кошкин Л. Н.** Условия осуществления автоматической системы машин в производстве изделий // Автоматика и телемеханика. 1951. Т. 12. Вып. 3. С. 201–215.
 38. **Быков В. А.** Кластерное оборудование для создания и исследования элементов нанoeлектроники // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 4. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/klasterное-oborudovanie-dlya-sozdaniya-i-issledovaniya-elementov-nanoelektroniki> Дата обращения: 04.07.2018.
 39. **Дубовой Н. Д., Осокин В. И., Очков А. С. и др.** Измерения и контроль в микроэлектронике. – М.: Высшая школа, 1984. 367с.
 40. **Бочаров А. В.** Метрология как наука о точности информационных измерений // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 1999. Вып. 1 (153). С. 73–82.
 41. **Kuhn M., Zhou Y., Johnson K.** Opportunities and Challenges for Lab-based Hybrid Metrology for Emerging Technologies // Frontiers of characterization and metrology of nanoelectronics, March 21–23, 2017, California, Monterey. – pp. 38–41.
 42. **Горнев Е. С. и др.** Метрология в микроэлектронике, микросистемной технике и нанотехнологии: учебное пособие. – М.: Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования «Московский гос. технический ун-т радиотехники, электроники и автоматики», 2012.
 43. **Миронов А. В.** Философия науки, техники и технологий. – М.: МАКС Пресс, 2014. 272 с.
 44. **Максимов С.** Проблемы измерений субмикронных размеров в микроэлектронике США // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 1997. № 3–4. С. 65–68.
 45. **Максимов С.** Измерения ультрамалых размеров в микроэлектронике. Российский метод // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 1997. № 6. С. 37–40.
 46. **Волоховский А. Д.** Исследование и разработка системы характеристики процессов формирования наноразмерных элементов интегральных

- схем / Автореф. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук по спец 05.27.01. – М.: МИЭТ, 2018. 27 с.
47. **Герасименко Н.Н., Чамов А.А., Медетов Н.А., Ханин В.А.** Особенности формирования рельефа при травлении кремния фокусированным ионным пучком // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 36. Вып. 21. С. 38–45.
 48. **Koller R.** Konstruktionsmethode für den Maschinenbau. – Geräte und Apparatebau, Springer, Verlag, 1976.
 49. Метод поискового конструирования Р. Коллера. Режим обращения: <http://karev.narod.ru/koller.htm> Дата обращения: 30.07.2018.
 50. **Панфилов В.Н.** Технологические линии пищевых производств (теория технологического потока). – М.: Колос, 2003. 288 с.
 51. **Булатов Г.Я.** Введение в общую теорию технологий (на примере строительства): учебное пособие. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2002. 174 с.
 52. **Italyantsev A. G.** Solid-phase reaction on silicon surface. Accompanying processes // J. Appl. Phys. 1996. V. 79 (5). PP. 2369–2375.
 53. **Красников Г.Я., Гущин О.П., Литаврин М.В., Горнев Е.С.** DSA – комплементарный метод усиления разрешения иммерсионной литографии // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2017. № 1 (165). С. 4–17.
 54. **Моро У.** Микролитография. Принципы, методы, материалы. В 2-х частях. – М.: Мир, 1990. 605+632 с.
 55. **Гущин О.П., Матюшкин И.В., Морозов А.Д.** Логико-историческая реконструкция литографии в контексте нанотехнологий // Межотраслевой научно-практический журнал «Интеграл». 2013. № 3. С. 30–34.
 56. **Moshe E.** Preil Patterning Challenges in the sub-10 nm Era // Proc. SPIE9780, Optical Microlithography XXIX, 978002, 28 March 2016.
 57. **Soichi O., Noriyuki H.** Expected innovations of optical lithography in the next 10 years // PROCEEDINGS OF SPIE0277–786X, V. 9780, Optical Microlithography XXIX, 23–25 February 2016, San Jose, California, United States, paper 1.
 58. **Egorov A., Islyaykin A., Kiryushina I., Ranchin S.** Nitrogen concentration impact on defectivity during hydrogen peroxide / ammonium hydroxide mixture megasonic cleaning // 39th International Conference on Micro and Nano Engineering: Book of abstracts. London: MNE2013, 2013. P. 310.
 59. **Кiryushina И.В., Красавина Л.З., Просий А.Д., Селиванова И.Н., Яснов В.С.** Исследование и разработка технологических процессов очистки кремниевых пластин в модифицированных RCA- растворах // Известия ВУЗов. 2004. № 1. С. 53–59.
 60. **Кiryushina И.В., Красавина Л.З., Просий А.Д., Селиванова И.Н., Яснов В.С.** Исследование процесса травления SiO₂ и БФСС в травителе на основе HF в системе рециркуляционной фильтрации // Известия ВУЗов. 2004. № 2. С. 17–22.
 61. **Кiryushina И.В.** Процессы жидкостной химической подготовки кремниевых пластин в производстве СБИС с субмикронными проектными нормами / Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – М.: НПЦ «СПУРТ», 2003. 191 с.
 62. **Тетельбаум Д.И.** 40 лет ионной имплантации: взгляд в историю и перспективы // Вестник нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: физика твердого тела. 2001. № 2. С. 5–11.
 63. Сайт компании Case Technology. Режим доступа: <http://www.casetechnology.com/links.html> Дата обращения: 30.07.2018.
 64. **Masayasu T., Masao N.** History of Ion Implanter and Its Future Perspective // SEI TECHNICAL REVIEW. 2011. N. 73. PP. 22–30.

О КВАНТОВОМ ТЕЛЕГРАФЕ

► А. В. Белинский

МГУ им. М. В. Ломоносова

Предложена и обоснована новая версия эксперимента с коррелированной парой фотонов в запутанном (entangled) состоянии для передачи информации благодаря мгновенному коллапсу квантового состояния системы при измерении одной из частиц.

ON THE QUANTUM TELEGRAPH

A. V. Belinsky

MSU

A new version of the experiment with correlated pair of particles in entangled state is suggested and substantiated to transmit information due to the instant collapse of the quantum state of the system when one of the particles is measured.

В работах [1,2] было предложено и проанализировано схемное решение задачи о возможной передаче информации с использованием эффекта мгновенного коллапса вектора квантового состояния двух связанных частиц в запутанном (entangled) состоянии. При этом в силу ряда причин остались не раскрытыми следующие важные три вопроса:

- какова конкретная реализация возможности различных вероятностных законов срабатывания детекторов одного из наблюдателей при осуществлении или неосуществлении измерения вторым наблюдателем?
- почему в этом случае не работает по-communication теорема [3]?
- как это согласовать со специальной теорией относительности?

Попытке внесения ясности в эти чрезвычайно существенные вопросы посвящена данная работа.

Рассмотрим рисунок. По сравнению со схемой в [1] здесь наблюдателю А добавлены еще два детектора X_a и Y_a (крайние слева). Целесообразность этого действия будет ясна из последующего рассмотрения.

Рассмотрим пару запутанных фотонов, коррелированных по поляризации. Их вектор состояния равен

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|1\rangle_x^a |1\rangle_x^b |0\rangle_y^a |0\rangle_y^b + |0\rangle_x^a |0\rangle_x^b |1\rangle_y^a |1\rangle_y^b \right). \quad (1)$$

Здесь $|1\rangle$ – однофотонные фоковские состояния, $|0\rangle$ – вакуум, индексы «a» и «b» относятся, соответственно, к первому и второму фотону запутанной пары, а взаимно ортогональные поперечные направления x и y определяют ортогональные направления

поляризации. Структура этого вектора состояния такова, что, хотя направление поляризации x и y каждого из фотонов пары «a» или «b» равновероятны, между собой они строго коррелированы, поскольку их плоскости поляризации всегда совпадают при регистрации. Такие состояния обычно приготавливают с помощью параметрического рассеяния света (см., напр., [4, 5] и цитируемую там литературу).

Направим каждый из фотонов пары на призму Волластона, разделяющую взаимно ортогональные поляризации на два отдельных канала. Фактически она работает как светоделитель, а для фотонов с абсолютно случайной поляризацией – как 50%-ный светоделитель.

Перейдем теперь к невозмущающему измерению первого фотона. Установим в оба выходных канала после призмы Волластона среды с кубичной нелинейностью, в которых происходит фазовая самомодуляция (ФСМ). Поскольку оператор $\hat{n}(t)$ при ФСМ является инвариантом во времени, величина числа фотонов при ФСМ является невозмущаемой наблюдаемой и может быть невозмущающим образом измерена. Подадим на входы нелинейных сред с кубичной нелинейностью (кварцевых волокон, напр.), помимо измеряемых сигналов, еще и слабые пробные моды « p_1, p_2 » равной средней интенсивности, по измерению разности фаз которых попытаемся определить: находится ли первый фотон «a» в состоянии суперпозиции до «сильного» коллапсирующего измерения второго фотона «b», или же в одном из каналов после редукции вследствие такого сильного измерения.

Возьмем в качестве пробной моды однофотонное фоковское состояние $|1\rangle^p$. После 50%-ного светоделите-

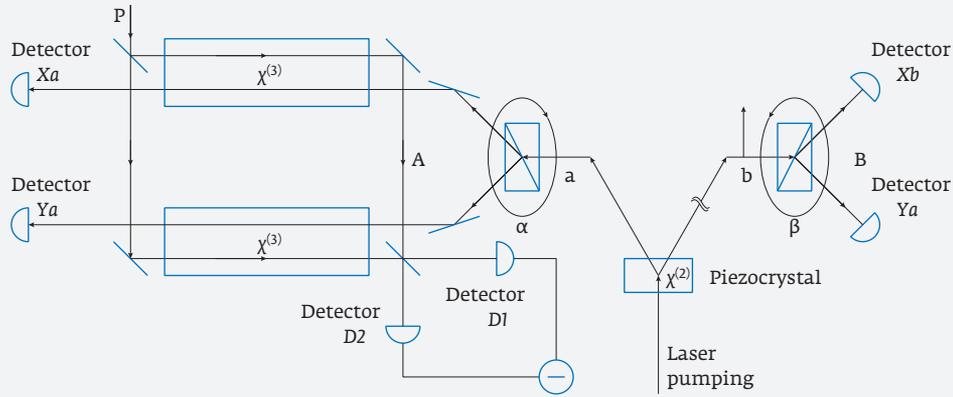


Рис. 1. Схема измерения наблюдателем А момента редукции вектора состояния в результате коллапсирующего измерения наблюдателем В. Наблюдатель А с помощью крайних левых детекторов Xa и Ya может установить, какой из детекторов наблюдателя В (Xb или Yb) сработал в случае, если он произвел коллапсирующее измерение

лея образуется суперпозиция $|\psi_p\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_1^p|0\rangle_2^p + |0\rangle_1^p|1\rangle_2^p)$.

Здесь индексы 1 и 2 относятся к плечам интерферометра.

Квантовое состояние системы в целом, после рождения пары запутанных фотонов и разделения их поляризационными призмами у наблюдателей А и В, описывается чистым состоянием с вектором

$$|\Psi_{abp}\rangle = \frac{1}{2} \left((|1\rangle_1^a|1\rangle_1^p|0\rangle_2^a|0\rangle_2^p + |1\rangle_1^a|0\rangle_1^p|0\rangle_2^a|1\rangle_2^p) |1\rangle_x^b|0\rangle_y^b + (|0\rangle_1^a|1\rangle_1^p|1\rangle_2^a|0\rangle_2^p + |0\rangle_1^a|0\rangle_1^p|1\rangle_2^a|1\rangle_2^p) |0\rangle_x^b|1\rangle_y^b \right). \quad (2)$$

Влияние нелинейности χ , описываемое оператором $\hat{U} = e^{-i\tilde{\chi}_{ap}\hat{n}_a\hat{n}_p/2}$ в случае кросс-взаимодействия (см., напр., [4] и цитируемую там литературу), дает

$$|\Psi'_{abp}\rangle = \frac{1}{2} \left((|1\rangle_1^a|1\rangle_1^p|0\rangle_2^a|0\rangle_2^p e^{-i\tilde{\chi}_{ap1}/2} + |1\rangle_1^a|0\rangle_1^p|0\rangle_2^a|1\rangle_2^p) |1\rangle_x^b|0\rangle_y^b + (|0\rangle_1^a|1\rangle_1^p|1\rangle_2^a|0\rangle_2^p + |0\rangle_1^a|0\rangle_1^p|1\rangle_2^a|1\rangle_2^p e^{-i\tilde{\chi}_{ap2}/2}) |0\rangle_x^b|1\rangle_y^b \right). \quad (3)$$

В представлении Гейзенберга действие светоделителя, расположенного перед детекторами разностной схемы, описывается как $\hat{a}'_p = \frac{\hat{a}_1 \pm \hat{a}_2}{\sqrt{2}}$. Плюс здесь

соответствует одному детектору D1, а минус – второму D2. Тогда получим, что среднее число фотоотсчетов

одного из детекторов D1 равно $\frac{1}{4} \left(2 + \cos \frac{\tilde{\chi}_{ap1}}{2} + \cos \frac{\tilde{\chi}_{ap2}}{2} \right)$, а другого D2 $\frac{1}{4} \left(2 - \cos \frac{\tilde{\chi}_{ap1}}{2} - \cos \frac{\tilde{\chi}_{ap2}}{2} \right)$.

В представлении Шредингера квантовое состояние системы на выходе интерферометра Маха-Цендера после выходного светоделителя описывается вектором

$$|\Psi''_{abp}\rangle = \frac{1}{2\sqrt{2}} \begin{pmatrix} (|1\rangle_1^a|0\rangle_2^a|1\rangle_x^b|0\rangle_y^b (e^{-i\tilde{\chi}_{ap1}/2} + 1) + |0\rangle_1^a|1\rangle_2^a|0\rangle_x^b|1\rangle_y^b (1 + e^{-i\tilde{\chi}_{ap2}/2})) |1\rangle_1^d|0\rangle_2^d + (|1\rangle_1^a|0\rangle_2^a|1\rangle_x^b|0\rangle_y^b (e^{-i\tilde{\chi}_{ap1}/2} - 1) + |0\rangle_1^a|1\rangle_2^a|0\rangle_x^b|1\rangle_y^b (1 - e^{-i\tilde{\chi}_{ap2}/2})) |0\rangle_1^d|1\rangle_2^d \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Здесь $|1\rangle_1^d|0\rangle_2^d$, $|0\rangle_1^d|1\rangle_2^d$ – состояния на входе детекторов, расположенных перед разностной схемой внизу рисунка, причем $|1\rangle_1^d|0\rangle_2^d$ соответствует срабатыванию первого детектора D1, а $|0\rangle_1^d|1\rangle_2^d$ – второго D2. Видно, что при срабатывании одного из них, то есть редукции выражения (4) к верхней или нижней его

строке, суперпозиция $|\psi_b\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle_x^b|0\rangle_y^b + |0\rangle_x^b|1\rangle_y^b)$ не редуцирует в одну из компонент этого состояния, что выражается в том, что в общем случае и $|1\rangle_x^b|0\rangle_y^b$, и $|0\rangle_x^b|1\rangle_y^b$ присутствуют в каждой из строк (4). Итак, такое измерение является поистине невозмущающим. При этом важно, чтобы числовые коэффици-

енты в (4) не оказались нулевыми. Лучше всего, чтобы по модулю они были одинаковыми. Тогда измерение, произведенное детекторами $D1$ или $D2$, будет полностью свободно от информации о том, в каком из каналов присутствует фотон запутанной пары.

Из выражения (4) также легко следуют и предыдущие результаты с косинусами.

Что же произойдет при коллапсирующем измерении состояния поляризации наблюдателем В? Состояние $|\psi''_{abp}\rangle$ редуцирует либо в правый, либо в левый столбец (4). А вероятности срабатывания

детекторов окажутся равными, либо $\frac{1}{2}\left(1 \pm \cos \frac{\bar{\chi}_{ap1}}{2}\right)$, либо $\frac{1}{2}\left(1 \pm \cos \frac{\bar{\chi}_{ap2}}{2}\right)$, где, как и выше, \pm соответствует

либо первому, либо второму детектору, то есть верхний знак – первому $D1$, а нижний – второму $D2$. Итак, чистое состояние переходит в смешанное с равными вероятностями (1/2) обоих исходов. А это означает то, что по результатам измерений нельзя отличить чистое состояние $|\psi''_{abp}\rangle$ от смешанного с вероятностью $\frac{1}{2}\left(1 \pm \cos \frac{\bar{\chi}_{ap1}}{2}\right)$, либо $\frac{1}{2}\left(1 \pm \cos \frac{\bar{\chi}_{ap2}}{2}\right)$, после проведения «сильного» коллапсирующего измерения наблюдателем В.

Но если при этом произвести еще одно последующее измерение наблюдателю А с помощью дополнительно введенных детекторов Xa , Ya , расположенных в самой левой части рисунка, то он сможет установить какой из детекторов наблюдателя В (Xb или Yb) сработал в случае, если он произвел коллапсирующее измерение. Предварительно надо установить такие нелинейные фазовые задержки, чтобы

косинусы $\cos \frac{\bar{\chi}_{ap1}}{2}$ и $\cos \frac{\bar{\chi}_{ap2}}{2}$ отличались друг от друга,

но числовые коэффициенты во всех четырех слагаемых (4) были равными по модулю. Это достигается

при $\cos \frac{\bar{\chi}_{ap1}}{2} = +\frac{\sqrt{2}}{2}$, и $\cos \frac{\bar{\chi}_{ap2}}{2} = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ (или наоборот).

В этом случае срабатывание детекторов $D1$, $D2$, расположенных перед разностной схемой в нижней части рисунка, вероятностно связаны со срабатываниями детекторов Xa и Ya , если, конечно, наблюдателем В было предварительно произведено коллапсирующее измерение. А если нет, то эти срабатывания будут случайными и равновероятными. Итак, если срабатывают детекторы, не соответству-

ющие вероятностному закону $\frac{1}{2}\left(1 \pm \cos \frac{\bar{\chi}_{ap1}}{2}\right)$ при срабатывании одного из дополнительных детекторов

(Xa) наблюдателя А, или $\frac{1}{2}\left(1 \pm \cos \frac{\bar{\chi}_{ap2}}{2}\right)$ при срабатывании другого (Ya), то наблюдатель А может заключить, что коллапсирующего измерения наблюдатель В не производил. Если же соответствуют, то произвел. В любом случае нужны повторные запуски запутанных пар фотонов, то есть для передачи 1 бита информации нужно дублирование его по крайней мере несколько раз. Но поскольку вероятностные законы при коллапсе и его отсутствии отличаются, все же может быть осуществлена коммуникация со сверхсветовой скоростью.

Другими словами, если наблюдатель В измерения не произвел, то вероятности срабатывания детекторов $D1$, $D2$ одинаковы (1/2), также как и вероятности срабатывания детекторов Xa и Ya , но фотосчеты $D1$, $D2$ никак не коррелированы с фотосчетами Xa и Ya .

Если же наблюдатель В произвел измерение, то вероятностному закону срабатывания детекторов $D1$, $D2$  $\frac{1}{2}\left(1 \pm \cos \frac{\bar{\chi}_{ap1}}{2}\right)$ должно соответствовать последующее срабатывание детектора Xa , а вероятностному

закону $\frac{1}{2}\left(1 \pm \cos \frac{\bar{\chi}_{ap2}}{2}\right)$ – последующее срабатывание

детектора Ya . Таким образом, по несовпадению этих вероятностных законов можно выяснить произвел ли наблюдатель В измерение или нет.

Теперь возникает вполне законный вопрос: как быть с no-communication теоремой [3]? Ведь там строго показано, что никакие результаты измерений наблюдателями А и В не могут нести информацию от одного к другому. Дело в том, что там с самого начала рассматриваются матрицы Крауса (Kraus matrices) $A_{\mu m}$ and $B_{\nu n}$, которые соответствуют исходному состоянию системы μ и результату измерения m у первого наблюдателя А и n у второго В. Эти матрицы, разумеется, коммутируют, поскольку измерения выполняются в разных точках пространства при регистрации разных мод. Этого условия достаточно, чтобы доказать no-communication теорему. Но в нашем случае важен не результат измерения у наблюдателя В, а сам факт того, что это измерение произведено или не произведено. В последнем случае результата вообще нет. Другими словами,

no-communication теорема исходит из того, что измерения произведены обоими наблюдателями А и В. В рассматриваемом же случае это не так. Наблюдатель В может измерения не производить. Это и есть та «лазейка» (loophole), которая позволила «обойти» no-communication теорему.

Остается еще проблема с соответствием СТО. Последняя, как известно, запрещает перемещение массивных объектов со сверхсветовой скоростью. Передача информации обычно всегда связана с материальными носителями, поэтому, казалось бы, и информацию нельзя передать быстрее c . Но уже сам факт мгновенного коллапса вектора квантового состояния, подтвержденный экспериментально (см., напр., [6, 7], где эта скорость превышает c на несколько порядков) внушает сомнения в этом ограничении. В [8, 9] нами сделана попытка объяснить эту парадоксальность эффектом теории относительности, очень близким к известному парадоксу близнецов. Кроме того, полученный здесь результат, видимо, свидетельствует в пользу информационной интерпретации квантовой теории (см., напр., [10, 11]), в которой нет принципиального ограничения на скорость информационных процессов.

ПРИЗНАТЕЛЬНОСТЬ

В заключении хотелось бы выразить огромную благодарность профессору С. П. Вятчанину, профессору Ф. Я. Халили и М. Х. Шульману за плодотворные дискуссии и конструктивную критику, в результате которых стало возможным написание этой работы.

КОНФИЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белинский А. В., Жуковский А. К.** «Слабые» измерения и сверхсветовая коммуникация // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия. 2016. № 5. С. 21–25.
2. **Белинский А. В.** Комментарий к работе «„Слабые“ измерения и сверхсветовая коммуникация» // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия. 2017. № 6. С. 127–128.
3. **Peres A., Termon D. R.** Quantum information and relativity theory // *Rev. Mod. Phys.* 2004. V. 76. № 1. P. 93–123.
4. **Клышко Д. Н.** Фотон и нелинейная оптика. М.: Наука, 1980. 254 с.
5. **Белинский А. В.** Квантовые измерения. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2015. 185 с.
6. **Hensen B., Bernien H., Dréau A. E. et al.** Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres // *Nature*. 2015. V. 526. P. 682–686. doi:10.1038/nature15759.
7. **Ma X., Kofler J., Zeilinger A.** Delayed-choice gedanken experiments and their realizations // *Rev. Mod. Phys.* 2016. V. 88. P. 015005–1 – 015005–28.
8. **Белинский А. В., Шульман М. Х.** Об относительности нелокальности для фототонных корреляций // *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2017. № 1. С. 38–45.
9. **Belinsky A. V., Shulman M. H.** On quantum correlations possible origin // *Journal of Russian Laser Research* 2017. V. 38. No. 3. P. 230–240.
10. **Brukner C., Zeilinger A.** Malus' law and quantum information. // *Acta Phys. Slovaca*. 1999. V. 49. No. 4. P. 647–652.
11. **Brukner C., Zeilinger A.** Operationally Invariant Information in Quantum Measurements // *Phys. Rev. Lett.* 1999. No. 17. V. 83. P. 3354–3357.

29 июля 2018 года на 74-м году ушел из жизни выдающийся российский учёный, член-корреспондент РАН Виталий Васильевич Аристов (29.04.1945 – 29.07.2018)

С именем Виталия Васильевича связано большое направление российской и мировой науки. Он стоял у истоков создания и разработки фокусирующих элементов рентгеновской оптики, без которых в настоящее время немислим целый ряд исследований с применением рентгеновского излучения на лабораторных и синхротронных источниках рентгеновского излучения, лазерах на свободных электронах. В середине 80-х годов прошлого столетия Виталий Васильевич предложил революционное решение – создание Брэгг-Френелевской оптики, принцип работы которой заключается в совмещении брэгговской дифракции на кристаллической решетке или многослойном интерференционном рентгеновском зеркале и дифракции Френеля на искусственно созданном рельефе. С созданием в Институте проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук Брэгг-Френелевской оптики появились широкие возможности для реализации различных рентгенооптических схем, обладающих пространственным разрешением 10 нм и дифракционной эффективностью до 80%. В настоящее время Брэгг-Френелевские линзы, а также другие типы линз, созданные в ИПТМ РАН, используются на источниках синхротронного излучения и лазерах на свободных электронах в России, Франции, Германии, Японии и США в качестве базовых оптических элементов для рентгеновской микроскопии и топографии. Виталий Васильевич стал основателем российской школы рентгеновской оптики, а работа по совмещению брэгговской дифракции и дифракции Френеля номинировалась на Нобелевскую премию в области физики.

Параллельно с середины 80-х годов Виталий Васильевич принимал непосредственное участие в развитии микроэлектроники, под его руководством проводились работы в области электронно-лучевой литографии, что сегодня позволяет осуществлять работы по реализации российской установки многолучевой электронной литографии. Уже в 90-х годах прошлого столетия проводились исследования в ИПТМ РАН по созданию структур методом электронно-лучевой литографии с размером до 5 нм. Сегодня это называется нанoeлектроника.



Ученый мирового уровня, Виталий Васильевич являлся выдающимся физиком, специалистом с широчайшим кругозором: от физики рентгеновских лучей и технологии микроэлектроники до квантовой механики. С 1988 по 2004 годы Виталий Васильевич возглавлял Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, проявив незаурядные организаторские и управленческие способности. Благодаря его активности Институт прошел сложные 90-е годы, не растеряв свой научный потенциал и сохранив лидирующие позиции в своих отраслях мировой науки. Виталий Васильевич в течение многих лет являлся заведующим кафедрой «Микро- и нанoeлектроники» Московского физико-технического института.

Виталий Васильевич Аристов – автор и соавтор более 300 научных работ, 3 монографий и 18 авторских свидетельств. Научная деятельность В. В. Аристова была отмечена премией Ленинского комсомола за создание рентгеновской голографии, а также государственными наградами Российской Федерации: орденами «Дружбы народов» и «Знак почета», медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени и медалью «За трудовое отличие».

Виталий Васильевич обладал активной гражданской и жизненной позицией. Он являлся одним из организаторов скаутского движения в городе Черноголовка и России, участвовал в социальной и политической жизни страны. Высказывал свое мнение по всем ключевым вопросам.

Светлая память о Виталии Васильевиче Аристове навсегда останется в наших сердцах.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ УСТОЙЧИВОГО ТОКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ КВАНТОВОГО ИСТОЧНИКА МОЩНОСТИ

Обычный электрический ток быстро затухает в кольце при наличии сопротивления и отсутствии электродвижущей силы. Но устойчивый ток, квантовое явление, наблюдающееся в кольцах из сверхпроводников, нормальных металлов и полупроводников благодаря квантованию Бора и эффекту Ааронова – Бома, не затухает сколь угодно долго при этих условиях. Было обнаружено, что устойчивый ток, как и обычный круговой ток, создает постоянную разность потенциалов, когда асимметричное кольцо или его сегменты переключаются между сверхпроводящим и нормальным состояниями. Данный экспериментальный результат однозначно свидетельствует о том, что асимметричное кольцо при определенных условиях является источником мощности постоянного тока. Предлагается использовать систему асимметричных сверхпроводящих колец в качестве рабочего источника постоянного тока в случае, когда кольца переключаются неравновесными тепловыми шумами.

Ключевые слова: источник мощности постоянного, устойчивый ток, асимметричные сверхпроводящие кольца, квантование Бора, эффект Ааронова – Бома

Сведения об авторах:

Аристов Виталий Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, Институт проблем технологии микроэлектроники и особых материалов Российской академии наук, 142432, Московская область, Ногинский район, Черноголовока, Институтская ул., д. 6, e-mail: aristov@iptm.ru;

Николов Алексей Васильевич, кандидат физико-математических наук, Институт проблем технологии микроэлектроники и особых материалов Российской академии наук, 142432, Московская область, Ногинский район, Черноголовока, Институтская ул., д. 6, e-mail: nikulov@iptm.ru

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ СПИН-ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ТОКОМ ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР НА БАЗЕ ПЕРМАЛЛОЙ

В работе обсуждается возможность практического использования эффектов смещения доменных границ током в полосковых структурах пермаллой, пермаллой / медь, пермаллой / тантал, пермаллой / ниобий. Сообщается об обнаружении интересного для приложений эффекта – раскрытии доменной границы в домен с поперечной намагниченностью, происходящего со скоростью ~ 4000 м / с, который может быть использован для последовательного обратимого переключения ряда элементов локальным магнитным полем.

Ключевые слова: спинтроника, динамика доменных границ, спин-поляризованный ток, пермаллой

Сведения об авторах:

Успенская Людмила Сергеевна, доктор физико-математических наук, Институт физики твердого тела Российской академии наук, 142432, Московская обл., г. Черноголовока, ул. Ак. Осипяна, 2, e-mail: uspenska@issp.ac.ru

ЭФФЕКТ РАЗДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ПАР ФРЕНКЕЛЯ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ СТРУКТУР SiO₂-Si

В работе исследуются особенности накопления первичных радиационных дефектов, образованных при имплантации структуры SiO₂-Si с проецированным пробегом ионов равным глубине залегания границы раздела фаз. Методами рентгеновской дифрактометрии обнаружен эффект устойчивого разделения первичных дефектов

ABOUT POSSIBILITY OF USE OF ENERGY OF THE PERSISTENT CURRENT FOR MAKING OF A QUANTUM POWER SOURCE

An electric current induced in a resistive circuit will rapidly decay in the absence of an applied voltage. But the persistent current, quantum phenomenon observed in rings of superconductors, normal metals and semiconductors due to the Bohr quantization and the Aharonov-Bohm effect does not decay any long time under these conditions. It was discovered that the persistent current, like conventional circular current, induces a DC voltage when the asymmetric ring or its segments are switched between superconducting and normal states. This experimental result clearly suggests that the asymmetric ring is a DC power source under certain conditions. It is proposed to use the system of asymmetric superconducting rings as a working DC source in the case when the rings are switched by non-equilibrium thermal noise.

Keywords: dc power source, persistent current, asymmetric superconducting rings, the Bohr quantization, the Aharonov-Bohm effect

Data of authors:

Aristov Vitaliy Vasilievich, Doctor of physical and mathematical Sciences, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Institute of Microelectronics Technology, Russian Academy of Sciences, 6, Institutskaya, Chernogolovka, Noginsk district, Moscow, 142432, e-mail: aristov@iptm.ru;

Nikulov Alexey Vasilievich, candidate of physical and mathematical Sciences, Institute of Microelectronics Technology, Russian Academy of Sciences, 6, Institutskaya, Chernogolovka, Noginsk district, Moscow, 142432, e-mail: nikulov@iptm.ru

SPIN-POLARIZED CURRENT SWITCHING OF PERMALLOY BASED HYBRID STRUCTURES

The applicability of the spin-polarized current for magnetic domain motion in single-layer permalloy stripes and bilayer permalloy / copper, permalloy / tantalum, permalloy / niobium stripes is discussed. The interesting for application effect of the transformation of the domain wall into the domain with perpendicular to the stripe in-plane magnetization is reported. The effect can be used for series switching of any magnetic field-sensitive elements with the rate of ~4000 m / s.

Keywords: spintronics, domain wall dynamics, spin-polarized current, permalloy

Data of authors:

Uspenskaya Ludmila Sergeevna, doctor of physical and mathematical Sciences, Institute of Solid State Physics of Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow region, Academician Ossipyan Street, 2, 142432, e-mail: uspenska@issp.ac.ru

THE EFFECT OF FRENKEL PAIRS COMPONENTS SEPARATION DURING ION IMPLANTATION INTO SiO₂-Si STRUCTURE

The features of radiation defects distribution after ion implantation of the SiO₂-Si structure with a projected ion range equal to the depth of the interface are investigated. The effect of a stable radiation defects separation at the SiO₂-Si interface which leads to the interstitial supersaturation of Si is observed using X-ray diffractometry.

на границе SiO₂-Si, приводящий к уникальной для радиационной физики ситуации пересыщения Si только по собственным междоузельным атомам.

Ключевые слова: ионная имплантация, многослойные структуры, SiO₂-Si, разделение пар Френкеля

Сведения об авторах:

Баранов Глеб Владимирович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12 / 1; Московский физико-технический институт (Государственный университет), 141700, Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9, e-mail: baranov@phystech.edu;

Итальянцев Александр Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12 / 1, e-mail: aitalyantsev@niime.ru;

Щербачев Кирилл Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, e-mail: chterb@gmail.com.

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ И ГЛУБИНЫ КОНТАКТОВ К СТОКУ / ИСТОКУ НА ПАРАМЕТРЫ 3D БЕСПЕРЕХОДНОГО МОП-ТРАНЗИСТОРА

В статье описаны результаты исследования влияния расположения контактных областей и их глубины на основные параметры 3D двузатворного беспереходного МОП-транзистора средствами TCAD. Показано, что в случае вертикальной конструкции прибора короткостокковый эффект проявляется лишь при расстоянии между стоковым контактом и электродом затвора менее 25 нм и усиливается при увеличении глубины контактной области. Приведено объяснение полученных зависимостей.

Ключевые слова: беспереходной транзистор, моделирование, tcad

Сведения об авторах:

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

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

Крупкина Татьяна Юрьевна, доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»; 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: krupkina@dtd.miee.ru;

Чаплыгин Юрий Александрович, академик Российской академии наук, президент Научно-исследовательского университета «Московский институт электронной техники», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский

Keywords: Ion implantation, multilayer structures, SiO₂-Si, Frenkel pairs separation

Data of authors:

Baranov Gleb Vladimirovich, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1-st Zapadny proezd, 12 / 1, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 141701, Russia, Dolgoprudny, Institutskiy per. 9, e-mail: baranov@phystech.edu;

Italyantsev Aleksandr Georgievich, doctor of physico-mathematical Sciences, professor, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1-st Zapadny proezd, 12 / 1, e-mail: aitalyantsev@niime.ru;

Shcherbachev Kirill Dmitrievich, candidate of physical and mathematical Sciences, associate professor, National University of Science and Technology "MISIS", office 626, 4, Leninskiy prospect, Moscow, 119049, e-mail: chterb@gmail.com.

INFLUENCE OF THE SPACER LENGTH AND CONTACT DEPTH ON THE 3D JUNCTIONLESS MOSFET CHARACTERISTICS

Dependences of spacer length and junction depth on electrical parameters for double-gate junctionless transistor were calculated using Sentaurus TCAD simulation package. It was shown in double-gate junctionless MOSFET, short-drain effect appears only at spacer length less than 25nm. This effect enhanced with increase in junction depth.

Keywords: junctionless transistor, simulation, tcad

Data of authors:

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

Krasukov Anton Yurievich, Candidate of Engineering Sciences, Docent of the Department of Integrated Electronics and Microsystems; National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: a_kras@org.miet.ru;

Krupkina Tatiana Yurievna, Doctor of Engineering Sciences, Professor the Department of Integrated Electronics and Microsystems; National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: krupkina@dtd.miee.ru;

Chaplygin Yury Alexandrovich, Academician of Russian Academy of Sciences, President of National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: ieem@miee.ru

институт электронной техники»; 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: ietm@miee.ru.

СПОСОБ УДАЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИЗ ВХОДНОГО СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОГО ЗАШУМЛЕНИЯ И АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Целью исследования является разработка способа выделения полезного сигнала, поступающего с первичных преобразователей физических величин, таких как МЭМС, из сигнала, представляющего собой результат эксперимента.

Отсутствие полной и достоверной информации о характере полезного сигнала и шума при условии, что обе указанные составляющие находятся в одном и том же частотном диапазоне, обуславливают определенные трудности при работе с сигналами, поступающими с подобных источников. Это определяет актуальность разработки такого способа фильтрации, который даст возможность выделения полезного сигнала в условиях априорной неопределенности. Данный способ может представлять интерес практически во всех областях современной техники, использующей в качестве первичного источника сигнала данные, поступающие с датчиков, выполняющих измерение параметров физических величин, предсказание точных значений которых не представляется возможным.

Для решения поставленной задачи представляется целесообразным обратиться к теории выбросов случайных процессов и на базе существующих решений сформулировать новый подход путем выдвижения гипотезы о наличии функциональной связи между наивероятнейшим значением длительности положительного выброса и периодом следования точек в реализации случайного процесса, степень зависимости которых является минимальной. Это дает возможность рассматривать результаты эксперимента в качестве реализации случайного процесса, подчиняющегося известному закону распределения, и сформулировать основные граничные условия, при выполнении которых предлагаемый способ будет универсален для широкого класса источников первичного сигнала.

Ключевые слова: априорная неопределенность, оптимальная фильтрация, методы обнаружения и предсказания сигналов, МЭМС

Сведения об авторах:

Шалимов Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»; 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: 85e@mail.ru.

ФИЗИЧЕСКОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ МНОГОФАЗНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МЕТАЛЛ-УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА БАЗЕ КАРБИДОВ

Решена фундаментальная научная задача для микро- и наноэлектроники – разработаны методы создания и исследования свойств физически легированных материалов с пространственно-неоднородной структурой на микро- и нанометровом масштабе. Разработаны наноструктурированные материалы с повышенной прочностью и износостойкостью, неоднородные на нанометровом уровне, физически легированные наноструктурами – квантовыми ловушками для свободных электронов. Решение этой задачи позволит создавать новые наноструктурированные материалы, исследовать с высокой точностью их различные физические параметры,

METHOD OF ELIMINATION OF THE CONSTANT RANDOM COMPONENT FROM THE INPUT SIGNAL WITH SMALL SIGNAL-TO-NOISE RATIO UNDER PRIOR UNCERTAINTY CONDITIONS

The present work describes the method of extraction of informative signal from primary converters of physical values such as MEMS, which represent the result of experiment.

Missing of reliable information about the type of informative signal and noise on the assumption of the identical frequency band for both of them, causes the appearance of difficulties during the processing of input signal. This determines the actuality of development of such method of extraction of informative signal, which will give the ability to work under prior uncertainty conditions. This method can be useful in different fields of science, which operates with data from sensors, performing the measure of physical values, which exact values cannot be predicted.

Described task can be solved with the help of theory of splashes of random values in order of developing new method on the base of the hypothesis of presence of relation between the most probable value of duration of positive splash and the period of signal count, with the minimum amount of dependence between this counts. This hypothesis gives the ability to analyze the results of experiment like the realization of random process, which can be described with one of the well-known distribution laws and to formulate the boundary conditions for achieving of universality of the present method.

Keywords: prior uncertainty; optimal filtration; signal detection and prediction; MEMS

Data of authors:

Shalimov Andrey Sergeevich, candidate of technical Sciences, Associate Professor, National Research University of Electronic Technology; Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: 85e@mail.ru.

PHYSICAL DOPING FOR CONTROL OF NANOCRYSTALLINE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MULTIPHASE COMPOSITE METAL-CARBON COATINGS ON THE BASIS OF TRANSITION METAL CARBIDES

The fundamental scientific problem for micro- and nanoelectronics has been solved – methods for creating and investigating properties of physically doped materials with spatially inhomogeneous structure at the micro- and nanometer scale have been developed. Nanostructured materials, including those with increased strength and wear resistance, are inhomogeneous at the nanolevel, physically doped with nanostructures-quantum traps for free electrons. The solution of this problem will allow creating new nanostructured materials, investigating their various physical parameters with high accuracy, designing, manufacturing and operating devices with new technical and functional capabilities, including for the nuclear industry. The method for multiphase

конструировать, изготавливать и эксплуатировать устройства с новыми техническими и функциональными возможностями, в том числе и для атомной промышленности. Разработан метод многофазных наноструктурных композиционных покрытий (на основе карбидов переходных металлов) с высокой твердостью 30 ГПа, низкий коэффициент трения до сухого 0,13–0,16, с высокой термостойкостью до 3000 °С и термической стабильностью нанокристаллического состояния более 1200 °С. Управление нанокристаллической структурой и свойствами карбидных композитных многофазных покрытий осуществляется путем изменения концентрации свободного углерода в них для образования в материале нанографита аморфной фазы. Установлено, что присутствие нанографита в композите значительно улучшает ударную вязкость и расширяет диапазон возможных применений таких композитов по сравнению с чистыми карбидами.

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

Сведения об авторах:

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

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

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

Беляев Виктор Васильевич, доктор технических наук, 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, e-mail: vic_belyaev@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕГАТИВНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ СЕРИИ ФН-16У ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАСКИ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Показано, что «взрывная» фотолитография с фоторезистами серии ФН-16У позволяет производить качественную металлизацию подложек тугоплавкими металлами (Pt) без использования установок ионно-лучевого травления. В технологии можно использовать как проекционный, так и контактный способ формирования скрытого изображения в пленке фоторезиста, а также получить существенную экономию драгоценного металла.

Ключевые слова: негативный фоторезист; металлизация; тугоплавкий металл, «взрывная» литография

Сведения об авторах:

Афанасьев Михаил Мефодьевич, Акционерное общество «Ангстрем», 124460, Россия, город Москва, город Зеленоград, площадь Шокина, дом 2, строение 3; e-mail: afanasyevmm@angstrem.ru;

nanostructured composite coatings (based on carbides of transition metals) with high hardness of 30 GPa, a low coefficient of friction to dry 0,13–0,16, with high heat resistance up to 3000 °C and thermal stability in the nanocrystalline state over 1200 °C is developed. Management nanocrystalline structure and properties of carbide composite multiphase coatings is performed by varying the concentration of free carbon in them to form in the material of the amorphous phase nanographite. It is established, the presence nanographite in the composite significantly improves the impact strength and extends the range of possible applications, compared with pure carbides.

Keywords: nanocomposite, transition metal carbides, nanocomposite properties, friction coefficient, wear resistance, temperature resistance of nanocomposites physical alloying

Data of authors:

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

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

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

Belyaev Victor Vasilevich, Doctor of technical science, Moscow Region State University, Professor, Peoples' Friendship University of Russia, 117198, Russia, Moscow, Miklukho-Maklaya street, 6, e-mail: vic_belyaev@mail.ru

THE USE OF NEGATIVE PHOTORESISTS FN-16U SERIES TO PRODUCE A METAL MASK OF REFRACTORY METALS

It was shown that the lift-off photolithography with photoresists FN-16U series gives high-quality metallization of substrates with refractory metals (Pt) without the use of ion-beam etching units. The technology can be used with both projection and contact methods to create image in the photoresist film, as well as to obtain significant savings in precious metal.

Keywords: negative photoresist, metallization; refractory metal, lift-off lithography

Data of authors:

Afanasyev Mikhail Mefodievich, Stock Company "Angstrem", 2 / 3, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: afanasyevmm@angstrem.ru;

Kuznetsova Nina Aleksandrovna, Doctor of Chemical Sciences, Federal state unitary enterprise "State scientific center "Organic Intermediates and Dyes Institute", 1 / 4, Bolshaya Sadovaya Street, Moscow, Russia, 123001, e-mail: lab32@niopik.ru;

Chaltseva Tatiana Vladimirovna, Federal state unitary enterprise "State scientific center "Organic Intermediates and Dyes Institute", 1 / 4, Bolshaya Sadovaya Street, Moscow, Russia, 123001, e-mail: tat.chaltseva@gmail.com.

Кузнецова Нина Александровна, доктор химических наук, Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный Научный Центр «Научно-исследовательский институт органических полупродуктов и красителей», 123001, г. Москва, ул. Большая Садовая, д. 1 корп. 4, e-mail: lab32@niopik.ru;

Чальцева Татьяна Владимировна, Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный Научный Центр «Научно-исследовательский институт органических полупродуктов и красителей», 123001, г. Москва, ул. Большая Садовая, д. 1 корп. 4, e-mail: tat.chaltseva@gmail.com.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ТЕХНОЛОГИИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА: ЧАСТЬ 3. УРОВЕНЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ

В этой части завершено обсуждение специфики биологических и социальных технологий. Раскрыта связь телеологического классификационного критерия для технологий и компонентов технологической операции (ТО). Предложено две концептуальные схемы, фиксирующие содержание понятия преобразования и ТО. На примере микроэлектроники обсуждаются возможные классификации ТО. Особое внимание уделяется раскрытию понятия «технэ» на уровне ТО. В контексте промышленной технологии выявлены общие тенденции эволюции ТО микроэлектроники.

Ключевые слова: технология, операция, преобразование, живые системы, общество, концептуальные методы, теория родов структур Бурбаки

Сведения об авторах:

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

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

Матюшкин Игорь Валерьевич, кандидат физико-математических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: imatushkin@niime.ru.

О КВАНТОВОМ ТЕЛЕГРАФЕ

Предложена и обоснована новая версия эксперимента с коррелированной парой фотонов в запутанном (entangled) состоянии для передачи информации благодаря мгновенному коллапсу квантового состояния системы при измерении одной из частиц.

Ключевые слова: невозмущающие измерения, запутанность, коллапс вектора состояния, нелинейная фазовая самомодуляция

Сведения об авторах:

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

GENERAL THEORY OF TECHNOLOGY AND MICROELECTRONICS: PART 3. TECHNOLOGICAL OPERATION LEVEL

This part completed the consideration of biological and social technologies specificity. The affinity of teleological classification criteria for technologies and technological operation (TO) components is revealed. Two conceptual schemes apprehending the transformation idea and TO structure are formalized. On the microelectronics example the possible classification of TO is discussed. Special attention is paid to the disclosure of "techné" within TO level. In context of industrial technology, general trends in the evolution of TO in microelectronics are revealed.

Keywords: technology, operation, transformation, living systems, society, conceptual methods, Bourbaki's theory of structures

Data of authors:

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

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

Matushkin Igor Valerevich, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, "Molecular Electronic Research Institute" Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadnyy proezd, d. 12 / 1, e-mail: imatushkin@niime.ru.

ON THE QUANTUM TELEGRAPH

A new version of the experiment with correlated pair of particles in entangled state is suggested and substantiated to transmit information due to the instant collapse of the quantum state of the system when one of the particles is measured.

Keywords: non-demolition measurements; entanglement; quantum state vector collapse; Kerr nonlinearity

Data of authors:

Belinsky Alexander Vital'evich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Physics of the Earth, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University; 1, building 2, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991; e-mail: belinsky@inbox.ru

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

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

Журнал издается 4 раза в год с 1965 года.
Подписано в печать 28.09.2018.

Отпечатано в типографии ООО «Красногорский полиграфический комбинат».
Номер заказа Е-5073.
✉ 107140, г. Москва, 1-й Красносельский пер., д. 3, оф. 17.

Тираж 500 экз. Цена договорная.

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

ИЗДАТЕЛЬ

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

КОРРЕКТОР: А. Лужкова

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВЕРСТКА: А. Небольсин