



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 2 (166) 2017

ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Issue 2 (166) 2017

Москва, 2017



"ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА"

Редакционный совет Главный редактор

Красников Г.Я., д.т.н.,
академик РАН

Члены редакционного совета

Аристов В.В.,

член-корреспондент РАН

Асеев А.Л., д.ф.-м.н.,
академик РАН

Бетелин В.Б., д.ф.-м.н.,
академик РАН

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

Бугаев А.С., д.ф.-м.н.,
академик РАН

Быков В.А., д.т.н.

Галиев Г.Б., д.ф.-м.н.

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

Горнев Е.С., д.т.н.,
зам. главного редактора

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

Зайцев Н.А., д.т.н.

Ким А.К., к.т.н.

Критенко М.И., к.т.н.

Немудров В.Г., д.т.н.

Петричкович Я.Я., д.т.н.

Сигов А.С., д.ф.-м.н.,
академик РАН

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

Чаплыгин Ю.А., д.т.н.,
академик РАН

Шелепин Н.А., д.т.н.,

зам. главного редактора

Эннс В.И., к.т.н.

Адрес редакции

124460 г. Москва, Зеленоград,
1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1

+7 495 229-70-43

journal_EEM-3@mikron.ru

www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

Журнал издается с 1965 года

Учредитель

АО "Научно-исследовательский
институт молекулярной
электроники"

ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Г. В. БАРАНОВ, А. Г. ИТАЛЬЯНЦЕВ, Ш. Г. ПЕСКОВ

Особенности перераспределения атомов As в Si при ионной
имплантации структур SiO₂-Si 4–10

К. А. ПАНЫШЕВ

Влияние расположения контактов к карманам в инверторе на
возникновение тиристорного эффекта, вызванного воздействием
тяжелых заряженных частиц 11–18

ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИЯ

Р. А. АРИЛИН, С. Н. КОТЕКИНА, И. А. КОРОТОВА, А. Н. ПОЛЯКОВ,
А. А. ГОРБАТОВ

Эффект локального отсутствия силицида кобальта в КМОП-технологии 20–23

Ю. Г. ДОЛГОВЫХ, А. И. ПОГАЛОВ, Г. А. БЛИНОВ

Исследование и разработка технологии создания микромодулей на
гибкой коммутационной плате 24–28

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В. А. БЫКОВ, В. В. ПОЛЯКОВ, А. С. КАЛИНИН, А. В. ШЕЛАЕВ

К научному приборостроению для нанотехнологии: сканирующая
зондовая микроскопия 30–44

СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Г. Я. КРАСНИКОВ, В. В. БАРДУШКИН, Д. А. КАРТАШОВ,

Ю. И. ШИЛЯЕВА, В. Б. ЯКОВЛЕВ

Влияние структуры и термоупругих характеристик компонентов на
средние напряжения в анодном оксиде алюминия с нитевидными
порами, заполненными поливинилиденфторидом 45–50

Н. А. ЗАЙЦЕВ, Г. Я. КРАСНИКОВ, Ю. И. ПЛОТНИКОВ

Физико-технологические особенности формирования системы Si-SiO₂
с нанотонкими слоями диоксида кремния 51–55

М. Н. ЖУРАВЛЕВ, Т. С. КАТАЕВА

Транспортные свойства органических полупроводников на основе
ветвящихся молекул транс-полиацетилена 56–62

Журнал включен Всероссийской аттестационной комиссией (ВАК)

в число изданий, рекомендованных для публикации статей соискателей
ученых степеней кандидата и доктора наук №1969

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

Editorial Council

Chief Editor

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

The Members

of Editorial Council

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

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

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

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

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

Bykov V.A., Sc. D.

Galiev G.B., Sc. D.

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

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

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

Zaitsev N.A., Sc. D.

Kim A.K., Ph.D.

Kritenko M.I., Ph.D.

Nemudrov V.G., Sc. D.

Petrichkovich Ya. Ya., Sc. D.

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

Stempkovskiy A.L., Sc. D.,

Full Member of the RAS

Chaplygin Y.A., Sc. D.,

Full Member of the RAS

Shelepin N.A., Sc. D.,

Deputy Chief Editor

Enns V.V., Ph.D.

Editorial Staff Address

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

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal_EEM-3@mikron.ru

🌐 www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

The journal is published since 1965

Founder

"Molecular Electronics Research
Institute" Stock Company

PHYSICAL PHENOMENA

G. V. BARANOV, A. G. ITALYANTSEV, SH. G. PESKOV

Redistribution Effects Of Ion Implanted As In SiO₂-Si Structure 4-10

K. A. PANYSHEV

The Influence Of The Well Tie Location In Inverter On The Occurrence
Of The Thyristor Effect Caused By Heavy Ions Strike 11-18

PROCESSES AND TECHNOLOGY

**R. A. ARILIN, C. N. KOTEKINA, I. A. KOROTOVA, A. N. POLYAKOV,
A. A. GORBATOV**

The Effect Of A Local Absence Of Cobalt Silicide In Cmos Technology..... 20-23

YU. G. DOLGOVYKH, A. I. POGALOV, G. A. BLINOV

Research And Development Technology For Creating Micromodules On
A Flexible Commutation Board24-28

PROCESSING AND MEASURING EQUIPMENT

V. A. BYKOV, V. V. POLYAKOV, A. S. KALININ, A. V. SHIRIAEV

Scientific Instruments For Nanotechnology: Scanning Probe Microscopy30-44

PROPERTIES OF MATERIALS

G. YA. KRASNIKOV, V. V. BARDUSHKIN, D. A. KARTASHOV,

YU. I. SHILYAEVA, V. B. YAKOVLEV

Effect Of The Structure And Thermoelastic Characteristics Of Components
On The Average Stress In Anodic Aluminum Oxide Having Pores Filled With
Polyvinylidene Fluoride 45-50

N. A. ZAYTSEV, G. YA. KRASNIKOV, YU. I. PLOTNIKOV

Physico-Technological Features Of The System Formation Si-SiO₂ With
Nanothin Layers Of Silicon Dioxide..... 51-55

M. N. ZHURAVLEV, T. S. KATAEVA

Transport Properties Of Organic Semiconductors Based On Branched
Molecules Of Trans-Polyacetylene..... 56-62

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)

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ As В Si ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ СТРУКТУР SiO₂-Si

► Г. В. Баранов^{1, 2}, А. Г. Итальянцев¹, Ш. Г. Песков²

¹АО «НИИМЭ», ²МФИ (ГУ)

Выполнен анализ эффекта накопления As в приповерхностных слоях Si при имплантации структур SiO₂-Si. Показано, что в ситуации когда средний проецированный пробег As лежит вблизи границы SiO₂-Si эффект является следствием устойчивого разделения радиационных пар Френкеля – вакансий и собственных междоузельных атомов Si по разные стороны границы SiO₂-Si. Построена модель, в основе которой лежит массоперенос As в составе пар As-I, качественно и количественно описывающая эффект накопления As в приповерхностных слоях Si.

REDISTRIBUTION EFFECTS OF ION IMPLANTED As IN SiO₂-Si STRUCTURE

G.V. Baranov^{1, 2}, A.G. Italyantsev¹, Sh.G. Peskov²

¹MERI SC, ²MIPT

The effect of As accumulation in the near-surface silicon layers after ion implantation of SiO₂-Si structures is analyzed. It is shown that the effect is due to Frenkel pairs stable splitting on opposite sides of the SiO₂-Si interface. A model of As accumulation effect is developed, which is based on the mass transfer of As in the As-I pairs.

ВВЕДЕНИЕ

Генерация радиационных пар Френкеля, их пространственное перераспределение, взаимодействие между собой и атомами примесей – одни из основных вопросов радиационной физики в целом и ионной имплантации в частности. В данной работе рассматриваются особенности формирования фона радиационных дефектов в гетерогенных слоистых структурах на примере имплантации ионов мышьяка As⁺ в монокристаллический кремний через пленку SiO₂. Следствия особенностей распределения разделенных пар Френкеля влияют на итоговое распределение имплантированных атомов As вблизи границы раздела слоистой структуры Si-SiO₂ и имеют важное значение при создании тонких сильно легированных слоев в технологии микроэлектроники [1].

Известно несколько экспериментальных работ, в которых обнаружено накопление имплантированных атомов As в приповерхностных слоях кристал-

лов кремния. В [2-4] экспериментально исследовано диффузионное перераспределение As в структуре SiO₂-Si в процессе низкотемпературного отжига (800-900 °C). В [2] предполагается, что аккумуляция As в области границы раздела обусловлена диффузионным стоком собственных междоузельных атомов кремния (I) к границе раздела SiO₂-Si. Авторы [3] считают, что эффект накопления As у границы раздела связан с твердофазной рекристаллизацией аморфизированного кремния, при которой движущийся из глубины к поверхности фронт рекристаллизации увлекает за собой атомы примеси к поверхности кристалла. При малых дозах имплантации предполагается [3], что граница SiO₂/Si служит непосредственным стоком для атомов As. Такой же гипотезы придерживаются и авторы [4], где детально исследуется механизм сегрегации мышьяка вблизи границы. Однако позже в [2] было показано, что эффект накопления As вблизи поверхности наблюдали и с предварительно удаленным SiO₂. В связи с этим,

следует признать, что механизм перераспределения As в структуре SiO₂-Si до сих пор остается неясным и требует дополнительного изучения.

В данной работе представлена новая трактовка специфического распределения As вблизи интерфейса структуры SiO₂-Si, базирующаяся на анализе общих закономерностей формирования распределения разделенных пар Френкеля в слоистых ионно-имплантированных гетероструктурах.

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ПАР ФРЕНКЕЛЯ В СЛОИСТОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ

В процессе упругого взаимодействия ускоренного иона с матричными атомами мишени вдоль траектории торможения образуются сначала первичные, а затем и разделенные пары Френкеля – вакансии V в атомной решетке и собственные атомы, смещенные в междоузельные положения I. При сквозной ионной имплантации примесных атомов в многослойные гетерогенные структуры из *i* слоев различной фазы V и I образуются в каждом слое (рис. 1).

Важно отметить, что распределения скоростей генерации разделенных пар Френкеля $g_v(x)$ и $g_i(x)$ пространственно смещены относительно друг друга вдоль направления пробега *x* [5–6]. Экспериментально установлено [6], что это смещение может достигать 0,5 R_p. Механизм такого явления в случае имплантации легких и тяжелых ионов, по-видимому, различен, но важно, что это общая тенденция, присущая не только кремниевой решетке, но и решеткам других фаз. В случае гомогенной мишени эффекты от такого сдвига в распределениях V и I частично нивелируются диффузионным перемешиванием и их взаимной рекомбинацией на стадии имплантации и постимплантационного отжига. Для ряда гетероструктур можно ожидать существенного усиления эффекта макроскопического разделения областей, обогащенных V и I. В первую очередь это относится к ситуации, когда величина проецированного пробега R_p совпадает или на несколько процентов меньше глубины залегания границы раздела двух фаз гетероструктуры. На рис. 1 такая граница раздела лежит между слоями 2 и 3. В этом случае большинство V остаются слева от границы раздела в фазах 1 и 2, а большинство I справа – в фазах 3 и 4. Дальнейшему диффузионному перемешиванию V и I и их последующей рекомбинации может мешать «диффузионная непрозрачность» границ раздела, связанная с различной природой V и I в фазах,

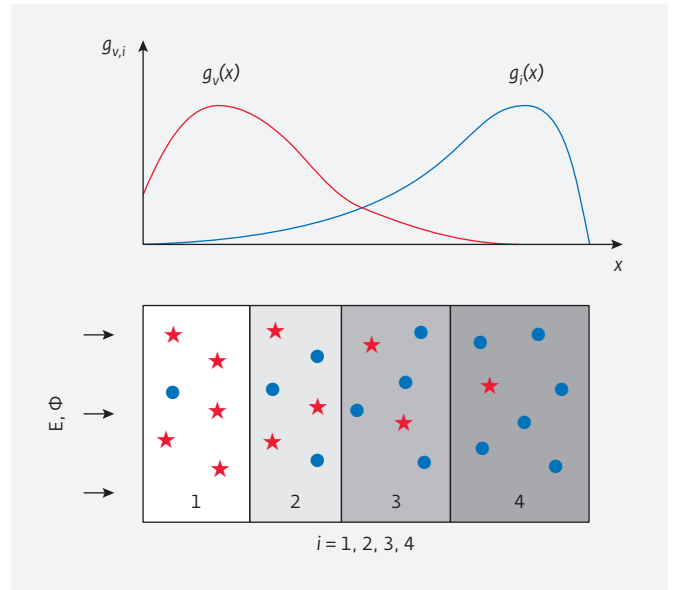


Рис. 1. Качественная картина распределения V (обозначены ★) и I (обозначены ●) при имплантации многослойных гетероструктур в области проецированного пробега R_p, сопоставимого с толщинами слоев гетероструктуры

различием в их подвижности, а также с эффектом сегрегации на границе раздела фаз.

В результате, гипотетически возможно возникновение уникальной для радиационной физики ситуации сепарирования компонент пары Френкеля в фазах многослойной гетероструктуры. Вследствие этого могут быть созданы особые, недостижимые при имплантации гомогенного образца, условия для диффузионного перераспределения имплантированных примесных атомов и эволюции радиационно-термических дефектов.

С математической точки зрения, распределения концентраций собственных дефектов C_V(x) и C_I(x) в слоистой структуре могут быть описаны классическим нестационарным уравнением диффузии (1), включающим диффузионный, генерационный $g(x)$ и рекомбинационный $r(x)$ члены уравнения.

$$\frac{\partial C_{I(V)}}{\partial t} = D_{I(V)} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + g(x) - r(x). \quad (1)$$

Решение представляется кусочно-гладкими кривыми с учетом граничных условий на интерфейсах фаз. Граничные условия задаются концентрациями C(x_i) и (или) потоками $D(\partial C/\partial x)|_{x_i}$ точечных дефектов на каждом *i*-ом интерфейсе. Решение может сшиваться или иметь разрывы при x_i в зависимости от прозрачности границ.

КАЧЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ДИФфуЗИОННОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ AS В ПОЛЕ МЕЖДОУЗЕЛЬНЫХ АТОМОВ

Рассмотрим ситуацию ионной имплантации As в структуру SiO₂-Si при условии $R_p \approx h$, где h – толщина термической пленки SiO₂. Из ранее приведенных рассуждений следует, что максимумы распределения V и I окажутся по разные стороны от границы раздела SiO₂-Si, причем большинство вакансий в SiO₂, а I в решетке Si (рис. 2а). Природа и подвижность V и I в SiO₂ и Si различна. Вакансии в SiO₂ относительно малоподвижны. Из квантово-механических расчетов [7] энергии активации миграции V в SiO₂ можно предположить, что их коэффициент диффузии при температуре 850 °C лежит в пределах от $1,5 \cdot 10^{-23}$ до $6 \cdot 10^{-15}$ см²/с в зависимости от фазового состояния SiO₂. Это означает, что в процессе облучения и последующего отжига они не могут перейти в фазу Si и инвертироваться в V кремниевой решетки. Таким образом, в результате имплантации As⁺ через SiO₂ при $R_p \approx h$ можно ожидать, что, благодаря «пространственному отсечению» V в слое SiO₂, решетка Si окажется пересыщена в основном I. Именно это положение будет определять начальные условия для формирования радиационно-термических дефектов и последующего диффузионного перераспределения As в структуре SiO₂-Si.

Механизм диффузии As в Si [8] носит комбинированный характер диффузии по вакансиям и с участием междоузлий. При этом доля β диффузии с участием междоузлий [8] достигает 40%, а отно-

шение коэффициентов диффузии D^*/D^0 As при неравновесных C_V и C_I и равновесных C_V^0 и C_I^0 концентрациях дефектов в Si задается выражением $D^*/D^0 = \beta C_I/C_I^0 + (1-\beta)C_V/C_V^0$. Величина отношений C_I/C_I^0 и C_V/C_V^0 при различных способах отклонения подсистемы дефектов от равновесия может варьироваться в широких пределах [9–10], но в случае достаточно тяжелого иона As⁺ даже при энергии в несколько кэВ с учетом макроскопического сепарирования должна составлять несколько порядков. Это означает, что на стадии постимплантационного отжига в фазе Si можно ожидать образование радиационно-термических объемных кластеров, дислокационных петель внедренного типа и одномерных кластеров в виде {113}-дефектов.

Далее будем считать, что максимум распределения этих относительно слабосвязанных радиационно-термических дефектов лежит в области максимума распределения I, то есть на ниспадающей ветви распределения As (рис. 2б). Тогда, на более поздних стадиях постимплантационного отжига, при распаде этих дефектов с испусканием I будет обеспечен разнонаправленный диффузионный поток I и связанные с ним потоки пар As-I. Причем один из потоков As-I будет направлен к поверхности слоя Si, а другой – в объем (рис. 2в). Наложение этой картины на изначально монотонно спадающий профиль As должен приводить к его деформации за счет увеличения концентрации As у поверхности и «на хвосте» распределения As, а также «провала» распределения в области максимума произведения концентраций As и радиационно-термических дефектов. Качественно аналогичная картина наблюдается

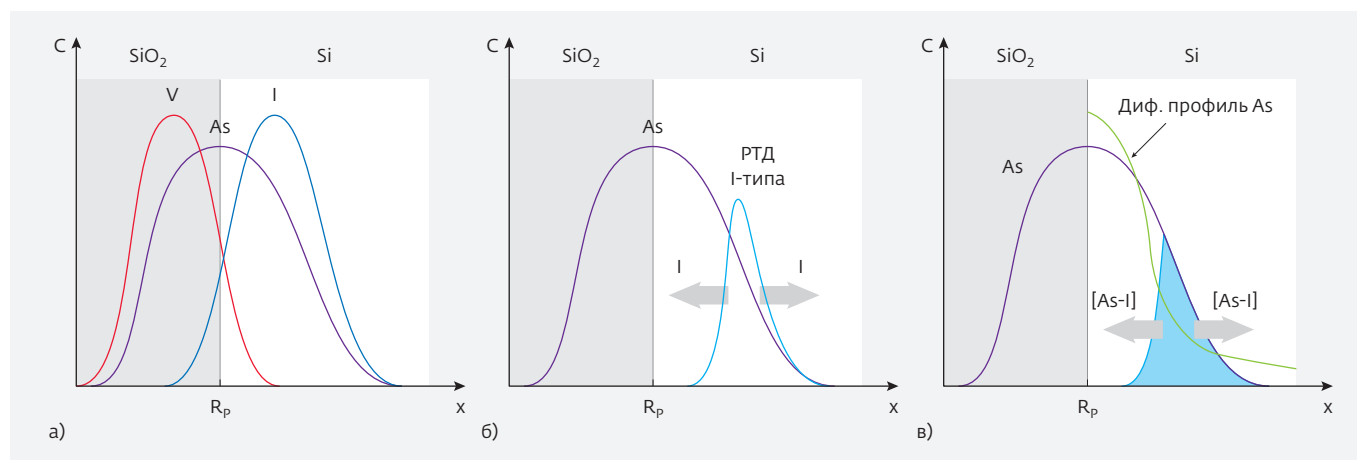


Рис. 2. Модельные представления диффузионного перераспределения As: а – сепарирование V и I в фазах структуры SiO₂-Si, б – формирование двух разнонаправленных потоков I в результате распада РТД, в – деформация профиля As, обусловленная диффузионными потоками пар [As-I]

в эксперименте [2]. Следует отметить, что в рамках предлагаемой модели обогащение поверхности Si атомами As будет происходить вне зависимости от того был или не был удален перед постимплантационном отжигом слой SiO₂.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ As

Для численного моделирования деформации профиля распределения As в описываемой ситуации детализируем механизм его диффузии с участием I. Детали механизма диффузии мышьяка посредством собственных междоузельных атомов Si до сих пор является предметом обсуждений. Собственные атомы Si могут стимулировать миграцию атомов As, вытесняя As из узлов решетки в междоузельное положение, или же образовывать с As подвижный комплекс As-I. В [11] из первых принципов на основе квантово-механических расчетов показано, что диффузия мышьяка в составе пар As-I осуществляется с энергией активации 3,75 эВ, что находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

Рассмотрим компоненты в подсистеме примесных атомов и собственных точечных дефектов на стадии распада радиационно-термических источников I. Подсистема примесных атомов включает в себя три компонента: атом As в узле решетки кремния (As), As в междоузельном положении (As_i) и As в составе пары As_i-I (рис. 3).

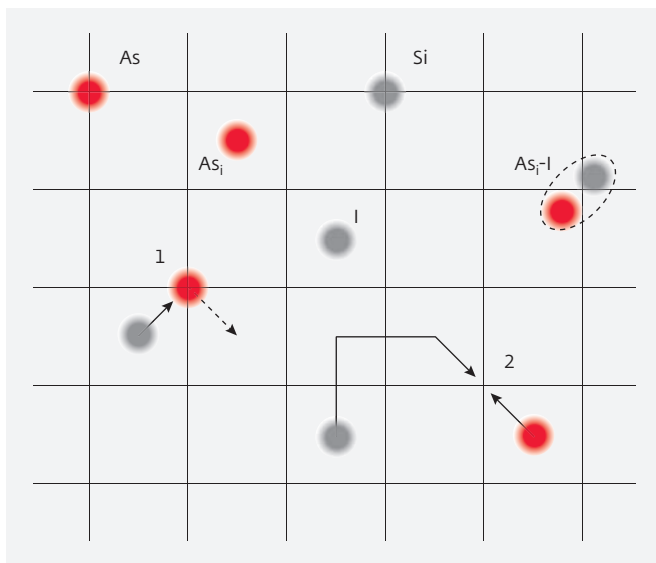


Рис. 3. Квазихимические реакции, протекающие в подсистеме As: 1 – замещение по Воткинсу, 2 – образование высокоподвижной пары As_i-I

При этом изменения долевого содержания каждого компонента описываются двумя квазихимическими реакциями. Собственные междоузельные атомы I вытесняют As из узлов по механизму замещения Воткинса [12]: [As]+[I]→[As_i]+[Si]. Мышьяк в междоузельном положении As_i при взаимодействии с I образует высокоподвижную пару As_i-I: [As_i]+[I]→[As_i-I]. Квазихимическая реакция с участием двух междоузельных атомов [As]+2[I]→[As_i-I]+[Si], также приводящая к появлению пары As_i-I, маловероятна как трехчастичная и далее во внимание не принимается. Далее будем считать, что доминирующий массоперенос определяется парой As_i-I.

С учетом сказанного, рассмотрим одномерную диффузионную задачу для пар As_i-I в полупространстве $x \in [0; +\infty)$:

$$\frac{\partial C_{As_i-I}}{\partial t} = D_{As_i-I} \frac{\partial^2 C_{As_i-I}}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где D_{As_i-I} – коэффициент диффузии пар, который в условиях пересыщенного раствора I может на несколько порядков превышать равновесное значение диффузии As.

Расчет проведем в следующих допущениях. Пренебрежем процессом диффузии имплантированной примеси в маске SiO₂ $x \in [0; h]$, где h – координата границы раздела SiO₂ и Si. Будем считать, что вероятность образования пары As_i-I составляет 50% вне зависимости от концентрации составляющих компонентов, то есть профиль распределения концентрации пары As_i-I в любой момент времени описывается функцией:

$$C_{As_i-I}(x, t) = \frac{1}{2} \min\{C_{As_i}(x, t); C_I(x, t)\}. \quad (3)$$

Концентрация мышьяка в междоузельном положении As_i определяется вероятностью вытеснения As из узлового положения (замещение по механизму Воткинса):

$$\frac{\partial(C_{As_i} - C_{As_i-I})}{\partial t} = \sigma C_{As} C_I, \quad (4)$$

где σ – сечение взаимодействия компонентов реакции. Указанный выше механизм вызывает и уменьшение узловой составляющей мышьяка:

$$\frac{\partial C_{As}}{\partial t} = -\sigma C_{As} C_I. \quad (5)$$

Раствор собственных междоузельных атомов постоянно пополняется за счет распада радиационно-термических дефектов со скоростью $G(x, T)$, выражение для которой будет определено ниже. Кроме

того, I достаточно высокоподвижны, а также способны замещать атомы мышьяка в узловом положении:

$$\frac{\partial(C_I - C_{As_i-1})}{\partial t} = D_I \frac{\partial^2(C_I - C_{As_i-1})}{\partial x^2} - \sigma C_{As} C_I + G(x, T), \quad (6)$$

где D_I – коэффициент самодиффузии кремния.

Собрав выражения (2) и (4), а также (2) и (6) приходим к системе уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_{As_i}}{\partial t} = D_{As_i-1} \frac{\partial^2 C_{As_i-1}}{\partial x^2} + \sigma C_{As} C_I, \\ \frac{\partial C_{As}}{\partial t} = -\sigma C_{As} C_I, \\ \frac{\partial C_I}{\partial t} = D_I \frac{\partial^2 C_I}{\partial x^2} + (D_{As_i-1} - D_I) \frac{\partial^2 C_{As_i-1}}{\partial x^2} - \sigma C_{As} C_I + G(x, T). \end{cases} \quad (7)$$

Границу раздела SiO_2/Si считаем непроницаемой как для атомов примеси, так и для I, а их концентрации на бесконечности нулевыми, то есть:

$$\left. \frac{\partial C_{As_i}}{\partial x} \right|_{x=t_f} = 0, \quad \left. \frac{\partial C_{As}}{\partial x} \right|_{x=t_f} = 0, \quad \left. \frac{\partial C_I}{\partial x} \right|_{x=t_f} = 0, \quad C_{As_i} \Big|_{x=\infty} = 0, \quad C_{As} \Big|_{x=\infty} = 0, \quad C_I \Big|_{x=\infty} = 0.$$

Выражение для скорости генерации I в единице объема кристалла представим в виде произведения плотности распределения радиационно-термических дефектов $U(x)$ на скорость их распада $V(T)$:

$$G(x, T) = U(x)V(T). \quad (8)$$

В соответствии с [13], скорость распада дефектов $V(T)$ будет определяться:

$$V(T) = n_s S_{act} v_D \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (9)$$

где n_s – поверхностная плотность атомов на эмитирующей поверхности дефекта, S_{act} – площадь активной поверхности дефектов, v_D – дебаевская частота колебаний атомов решетки для Si, составляющая величину порядка $2 \cdot 10^{13}$ Гц.

Энергия активации распада радиационно-термических дефектов E_a сильно зависит от типа дефектов. Так энергия распада {113} дефектов составляет порядка 3,7 эВ, а дислокационных петель – 4,5 эВ [14].

Будем считать, что максимум профиля As лежит на расстоянии R_p , то есть на границе раздела с окислом, а максимум распределения радиационно-термических дефектов лежит на $1,2R_p$ от поверхности

SiO_2 . Реально максимум их распределения является функцией температуры мишени при имплантации, массы, энергии и дозы ионов [15] и должен определяться для каждого случая отдельно.

Тогда распределения радиационно-термических дефектов имеет вид:

$$U(x) = m \exp\left(-\frac{(x-1,2R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right), \quad (10)$$

где ΔR_p – дисперсия распределения, а m – параметр, физически характеризующий плотность распределения дефектов в объеме подложки. Таким образом, все слагаемые в (7) определены.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ РАСЧЕТ. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Верификация модельных представлений проводилась путем численного расчета профиля распределения As на основе уравнений (7) с выше указанными граничными условиями в структуре SiO_2/Si на стадии постимплантационного отжига в соответствии с параметрами эксперимента, поставленного в работе [2]. Расчет проведен для толщины $h = 20$ нм пленки SiO_2 и энергии ионов $E = 30$ кэВ, выбранной таким образом, что средний проецированный пробег находится вблизи интерфейса SiO_2/Si . Доза имплантации принята $3 \cdot 10^{15}$ см⁻². При таких дозах после отжига экспериментально наблюдаются дислокационные петли и {113}-дефекты. Температура отжига принята 850 °С. Несмотря на то, что в эксперименте [2] время отжига составляло 4 ч, в расчете оно было установлено существенно меньше и составляло 40 с, что, по данным [16, 17], совпадает со временем распада радиационно-термических дефектов.

На рис. 4 по данным вторичной ионной масс-спектрографии [2] представлены исходный профиль распределения As после ионной имплантации (точки отмечены треугольниками) и профиль после отжига (точки отмечены квадратиками). На этом же рисунке приведены результаты численного расчета в соответствии с (7) с параметрами, определенными ниже.

В результате эксперимента концентрация примеси вблизи границы SiO_2/Si после диффузионного перераспределения выросла более чем в три раза. В области $x > 40$ нм происходит размытие хвоста распределения As. Наряду с этим наблюдается провал концентрации ионно-имплантированного профиля в области $1,5R_p$, где локализован максимум распре-

деления пар As_i-I . Из рис. 4 видно, что результаты расчета находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

Эффективный коэффициент диффузии As, по данным расчета, составил $3 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$, что существенно превосходит коэффициент диффузии в равновесных условиях ($2 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$). Полагая, что составляющая диффузии по вакансионному механизму пренебрежимо мала, отклонение реальной концентрации C_I от термодинамически равновесной C_I/C_I^0 в приповерхностных слоях Si во время распада радиационно-термических дефектов составляла около $1,5 \cdot 10^3$. Другие параметры, которые были приняты для совпадения результатов вычислений с экспериментом составили: $\sigma - 10^{-11} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$, $S_{act} - 1 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$, $m - 7,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Следует отметить, что из величины $S_{act} = 1 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ может быть получена оценка характерного размера дефектов усредненного на всем этапе эволюции дефектного фона во время отжига. В предположении, что основным типом радиационно-термических дефектов являются дислокационные петли, средний размер дефектов составит порядка $d \approx 28 \text{ нм}$. При этом среднее расстояние между дефектами составляет порядка $\sqrt[3]{1/m} \approx 50 \text{ нм}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследован эффект устойчивого разделения радиационных V и I на границе раздела гетерогенных структур.

Показано, что в ряде случаев он может существенно влиять на распределение примесных атомов. Среди условий эффекта отмечено то, что средний проецированный пробег внедренных ионов находится вблизи границы раздела фаз, а динамика перераспределения дефектов в этих фазовых состояниях существенно отличается.

На частном примере ионной имплантации атомов мышьяка As в гетерогенную структуру SiO_2/Si анализируются особенности диффузионного перераспределения As, вызванные эффектом пространственного отсечения V в слое SiO_2 .

С позиций квазихимических реакций, протекающих в объеме Si, описана физика перераспределения

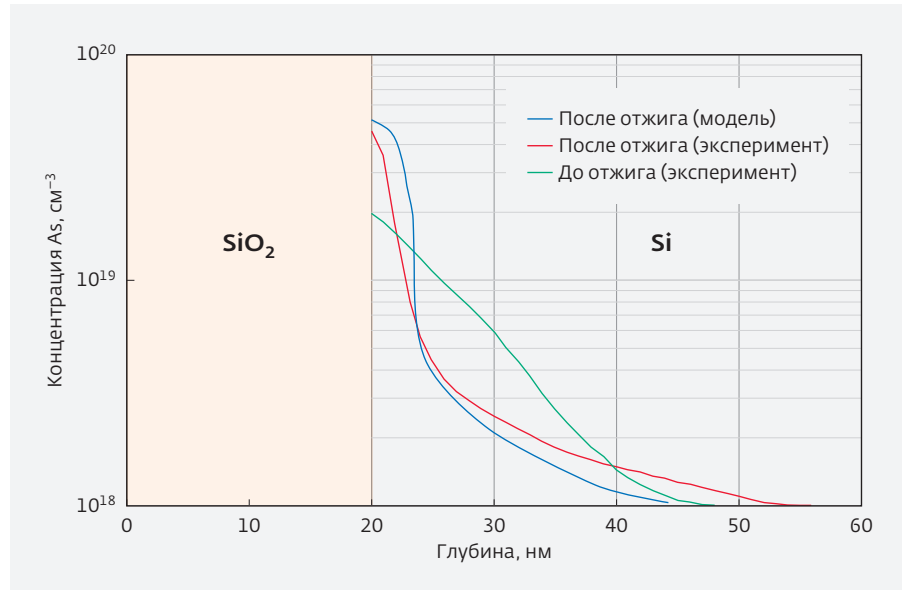


Рис. 4. Экспериментальные профили распределения As после имплантации и отжига (по данным [2]), а также рассчитанный профиль распределения As после термического отжига

подсистемы примесных атомов и ТД. Представлена теоретическая модель, описывающая динамику перераспределения этих подсистем, и проведен численный расчет диффузионного профиля распределения атомов As. Результаты расчета находятся в хорошем соответствии с имеющимися экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красников Г.Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов / Изд. 2-е, испр. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. С. 219–342
2. **Кибалов Д.С., Орлов О.М., Симакин С.Г., Смирнов В.К.** Анализ сверхтонких слоев имплантации мышьяка в кремнии методом вторично-ионной масс-спектрометрии // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 21. С. 21–26.
3. **Koh M., Egusa K., Furumoto H., Shirakata T., Seo E., Shibahara K., Yokoyama S., Hirose M.** Quantitative evaluation of dopant loss in 5–10 keV As ion implantation for low-resistive, ultrashallow source/drain formation // Jpn. J. Appl. Phys. 1999. V. 38. P. 2324–2328.
4. **Dabrowski J., Müssig H.J., Zavodinsky V., Baierle R., Caldas M.J.** Mechanism of dopant segregation to $SiO_2/Si(001)$ interfaces // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. P. 245305.
5. **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. С. 3442–3444.
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 вузов. Материалы электронной техники.* 2003. № 1. С. 66–71.
 7. **Yu D.** Multiscale Modeling of Formation and Structure of Oxide Embedded Silicon and Germanium Nanocrystals: PhD dissertation / Decai Yu. – Austin, 2005. 140 p.
 8. **Cowern N.E.B.** General model for intrinsic dopant diffusion in silicon under nonequilibrium point-defect conditions // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 64. No. 9. P. 4484–4490.
 9. **Italyantsev A.G.** Solid-phase reaction on silicon surface. Accompanying processes // *J. Appl. Phys.* 1996. V. 79. No. 5. С. 2369–2375.
 10. **Итальянцев А.Г.** Генерация вакансий, стимулированная химическим травлением поверхности кристалла // *Поверхность.* 1991. Вып. 10. С. 122–127.
 11. **Harrison S.A., Edgar T.F., Hwang G.S.** Interstitial-mediated mechanisms of As and P diffusion in Si: Gradient-corrected density-functional calculations // *Phys. Rev. B.* 2006. V. 74. No. 19. С. 195202.
 12. **Watkins G.D.** in *Radiation Damage in Semiconductors*, edited by P. Baruch. – Paris: Dunod, 1965. P. 97.
 13. **Итальянцев А.Г., Мордкович В.Н.** Трансформация размеров кластеров собственных точечных дефектов в полупроводниках // *Физика и техника полупроводников.* 1983. Т. 17. В. 2. С. 217–222.
 14. **Claverie A., Colombeau B., Assayag G.B., Bonafos C., Cristiano F., Omri M., de Mauduit B.** Thermal evolution of extended defects in implanted Si: impact on dopant diffusion // *Materials Science in Semiconductor Processing.* 2000. V. 3. No. 4. P. 269–277.
 15. **Курипятник А.В.** Особенности структуры ионоимплантированных слоев кремния, выявленные с помощью рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.10 / Курипятник Андрей Валериевич. – М., 2003. 136 с. – Библиогр.: с. 66–108.
 16. **Stolk P.A., Gossmann H.J., Eaglesham D.J., Jacobson D.C., Rafferty C.S., Gilmer G.H., Haynes T.E.** Physical mechanisms of transient enhanced dopant diffusion in ion-implanted silicon // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 81. No. 9. P. 6031–6050.
 17. RTA Simulation Using <311> Cluster Models [электронный ресурс] / SILVACO – Электрон. дан. – Режим доступа: http://www.silvaco.com/content/kbase/rta_ws.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 24.05.2017).

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ КОНТАКТОВ К КАРМАНАМ В ИНВЕРТОРЕ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТИРИСТОРНОГО ЭФФЕКТА, ВЫЗВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

► К. А. Панышев¹

¹АО «НИИМЭ»

Рассматривается эффект радиационно-индуцированной защелки, вызванной воздействием тяжелых заряженных частиц в инверторе, выполненном по объемной КМОП-технологии с проектной нормой 90 нм. Проанализировано возникновение тиристорного эффекта в зависимости от расположения контактов к n- и p-карманам в структуре. Подробно описано растекание заряда в структуре при падении заряженной частицы, по результатам которого предложены топологические решения, направленные на повышение устойчивости инвертора к тиристорному эффекту (ТЭ). Рассматриваются два варианта расположения контактов: контакт к p-карману в центре, к n-карману – с краю структуры; контакт к p-карману с краю, к n-карману – в центре структуры. Показано, что инвертор, выполненный по второму варианту топологии, обладает большей стойкостью к ТЭ, поскольку защелка не удерживается в структуре из-за медленного процесса диффузии дырок из правой части p⁺-истока. При этом в левой части p⁺-истока потенциал высокий ввиду расположения контакта к n-карману в центре структуры, и концентрация дырок там пренебрежимо мала. Если оба контакта к p-карману и n-карману находятся в центре инвертора, то можно добиться лучшей стойкости, однако вследствие правил проектирования для технологии с проектной нормой 90 нм площадь такого инвертора будет существенно выше.

THE INFLUENCE OF THE WELL TIE LOCATION IN INVERTER ON THE OCCURRENCE OF THE THYRISTOR EFFECT CAUSED BY HEAVY IONS STRIKE

K. A. Panyshv¹

¹MERI JSC

The effect of a radiation-induced latchup caused by the heavy ions strike in an inverter made on bulk 90 nm CMOS technology is considered. The occurrence of the thyristor effect depending on the location of the n- and p-well ties in the structure is analyzed. The charge spreading in the structure after heavy ion strike is thoroughly described, on the basis of which topological solutions aimed on increasing the stability of the inverter to the thyristor effect (TE) were suggested. Two versions of well tie location are considered: p-well tie in the center, n-well tie – at the edge of the structure; p-well tie at

the edge, n-well tie – in the center. It is shown that the inverter made on the second type of topology shows more endurance to TE since the latchup is not sustained in the structure due to the slow process of hole diffusion from the right side of the p⁺ source. In this case, the potential on the left of the p⁺ source is high because of the n-well tie location at the center of the structure, and the hole concentration is negligible there. If both well ties are placed in the center of the inverter, then one can achieve better radiation hardness, however due to the design rules of 90 nm technology the area of such inverter would be much bigger.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация полупроводниковых приборов в условиях интенсивного радиационного воздействия делает актуальной задачу повышения радиационной стойкости интегральных микросхем – базовых компонентов современной радиоэлектронной аппаратуры [1-4]. Дефекты, возникающие в полупроводниковых структурах при облучении, могут приводить как к постепенной деградации электрических характеристик приборов в ходе влияния поглощенной дозы (и, в конечном итоге, к их выходу из строя), так и к кратковременным сбоям и катастрофическим отказам вследствие воздействия одиночных ядерных частиц. Важным направлением создания радиационно-стойкой элементной базы является не только поиск технологических, схемотехнических или иных методов решения данной проблемы, но и возможность прогнозирования поведения полупроводниковых приборов после воздействия ионизирующих излучений.

Падение тяжелой заряженной частицы (ТЗЧ) может привести к возникновению тиристорной защелки в КМОП-элементах СБИС. Паразитная тиристорная структура включается при прохождении ТЗЧ через чувствительный объем прибора. С уменьшением проектной нормы с одной стороны уменьшается напряжение питания относительно напряжения удержания тиристорной структуры, что понижает чувствительность к защелке. С другой стороны, количество заряда, индуцированного ТЗЧ, необходимого для включения паразитной р-п-р-п-структуры уменьшается в случае глубоко субмикронных КМОП-элементов.

Среди методов повышения стойкости КМОП СБИС к ТЗЧ можно перечислить следующие: увеличение расстояния между п- и р-канальными транзисторами, уменьшение расстояния между истоковыми областями транзисторов и контактами к карманам [5-8], использование глубокого изолирующего кармана (без объединения с п-карманом) [9]. В данных работах отсутствует подробное описание механизма растекания носителей после падения тяжелой заряженной частицы, которое может помочь оптимизировать уже существующие методы повышения радиационной стойкости к одиночным эффектам.

Данная работа подробно освещает моделирование возникновения тиристорного эффекта в КМОП-элементах периферийных схем, выполненных по объемной технологии, на примере обычного инвертора. После краткого описания структуры, смоделированной в Sentaurus TCAD, представлено подробное исследование растекания заряда в структуре при падении частицы, по результатам которого предложены топологические решения, направленные на повышение устойчивости инвертора к тиристорному эффекту.

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ

С целью исследования тиристорного эффекта в элементах периферийных схем, вызванного воздействием ТЗЧ, проведено приборно-технологическое моделирование структуры, сформированной по коммерческой технологии с проектной нормой 90 нм в программном пакете Sentaurus TCAD. При моделировании первого варианта топологии элемента периферийных схем рассматривалась двумерная

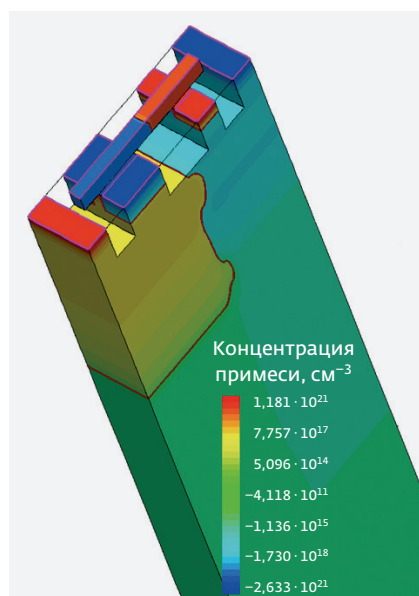


Рис. 1. 3D-изображение инвертора

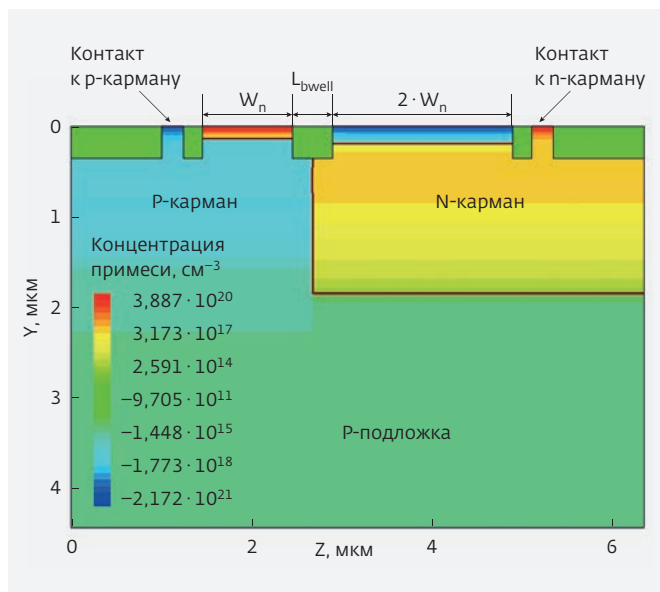


Рис. 2. Двумерное сечение инвертора

структура, представляющая собой сечение трехмерного инвертора (рис. 1) плоскостью Y-Z.

На рис. 2 изображена двумерная структура, которая непосредственно моделировалась в программном пакете TCAD. Расстояние между истоками p- и r-канальных транзисторов обозначено как L_{bwell} , а ширина каналов p- и r-MOПТ, соответственно, как W_n и $2 \cdot W_n$, при этом расстояния между истоками транзисторов и контактами к карманам минимальны и равны 0,21 мкм, согласно правилам проектирования для проектной нормы 0,09 мкм. Тяжелая заряженная частица Хе со значением линейной потери энергии, равным $69 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, падает в центр истока r-канального транзистора, который является уязвимым местом в подобных структурах с точки зрения возникновения тиристорного эффекта, как было показано ранее в работах [10, 11]. Концентрация примеси в подложке составляет $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщина подложки равна 50 мкм. Для ускорения расчета проводилось 2D-моделирование, полученные токи затем домножались на коэффициент, учитывающий ширину структуры. На анод (исток r-канального транзистора) и контакт к p-карману подается напряжение питания 1,2 В, остальные контакты заземлены. В модуле HeavyIon в Sentaurus TCAD дискретно задается зависимость линейной передачи энергии частицы от длины свободного пробега в кремнии. Использованные числовые значения получены из результатов испытаний на циклотроне [10]. Температурный диапазон – от 300 до 423 К.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Ширина p-канального транзистора W_n варьировалась в диапазоне от минимального значения 0,2 до 2 мкм с шагом в 0,6 мкм. Расстояние между r-канальным и p-канальными транзисторами L_{bwell} равнялось 0,44; 1; 1,5; 2,0 мкм. Результаты моделирования тиристорного эффекта в зависимости от температуры, ширины транзисторов и расстояния между r- и p-канальными транзисторами представлены в таблице и на рис. 3. Красным цветом отмечены ячейки, которые соответствуют образованию защелки. Желтые ячейки показывают отсутствие тиристорного эффекта в структуре.

Результаты моделирования показывают то, что с ростом ширины канала транзисторов чувствительность структуры к защелке возрастает. Это связано с тем, что при падении частицы в центр истока r-канального транзистора с увеличением параметра W_n растет расстояние от трека до контакта к кар-

Влияние ширины транзисторов и расстояния между ними на возникновение тиристорного эффекта

W_n , мкм	L_{bwell} , мкм	Температура, К			
		300	358	398	423
0,2	0,44	-	x	x	x
	1	-	-	-	x
	1,5	-	-	-	x
	2,0	Защелка не образуется			
0,8	0,44	-	x	x	x
	1	-	-	x	x
	1,5	-	-	-	x
	2,0	Защелка не образуется			
1,4	0,44	x	x	x	x
	1	-	x	x	x
	1,5	-	-	-	x
	2,0	Защелка не образуется			
2,0	0,44	x	x	x	x
	1	x	x	x	x
	1,5	-	-	x	x
	2,0	-	-	-	x

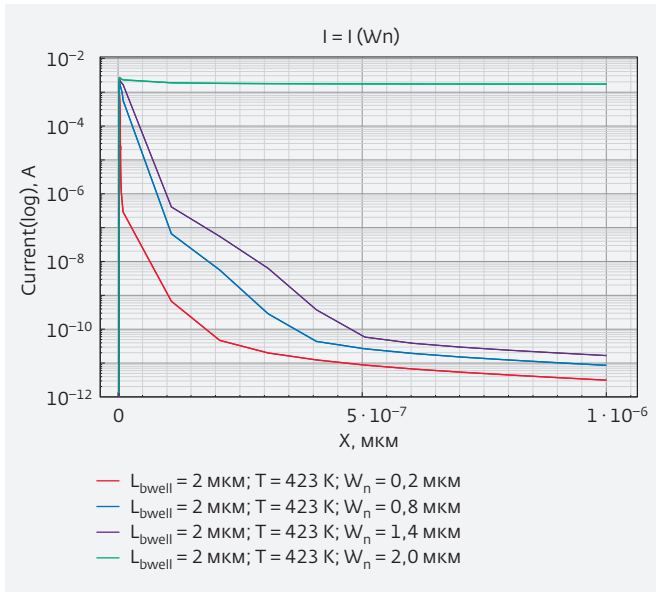


Рис. 3. Зависимость тока тиристорной структуры от ширины W_n n-канального транзистора

ману, в результате чего увеличивается сопротивление кармана и падение напряжения на этом сопротивлении также растет.

Вследствие того, что при максимальной температуре и ширине канала транзистора ($W_n = 2,0 \text{ мкм}$) возникает тиристорный эффект даже при разнесении p- и n-канальных транзисторов на расстояние $L_{\text{bwell}} = 2 \text{ мкм}$, было принято решение рассмотреть вариант структуры с контактами к соответствующим карманам в центре структуры.

Были промоделированы два варианта расположения контактов к карманам: контакт к p-карману в центре структуры, контакт к n-карману с краю; контакт к n-карману в центре, контакт к p-карману с краю.

Вариант № 1

Контакт к p-карману в центре структуры, к n-карману – с краю, при этом расстояние между транзисторами $L_{\text{bwell}} = 0,44 \text{ мкм}$ минимально и представляет худший случай с точки зрения чувствительности к защелке. Результаты моделирования представлены для случая ширины транзистора, равной $W_n = 24 \text{ мкм}$. Ниже на рис. 4 и 5 представлены распределения электронов и дырок, соответственно, спустя определенные промежутки времени. Вывод о том, защелкнулся инвертор или нет, проводился по уровню тока относительно значения 1 мкА.

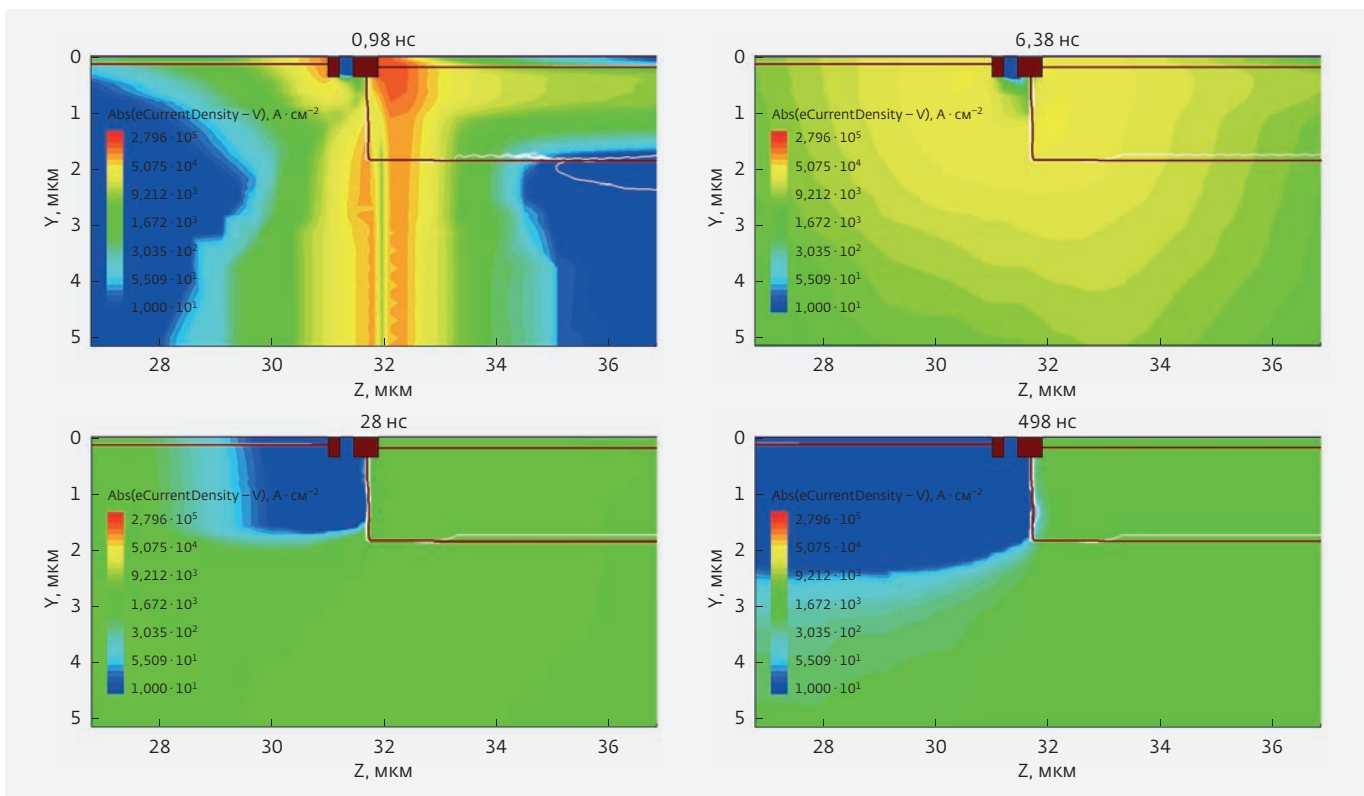


Рис. 4. Распределение электронов в структуре

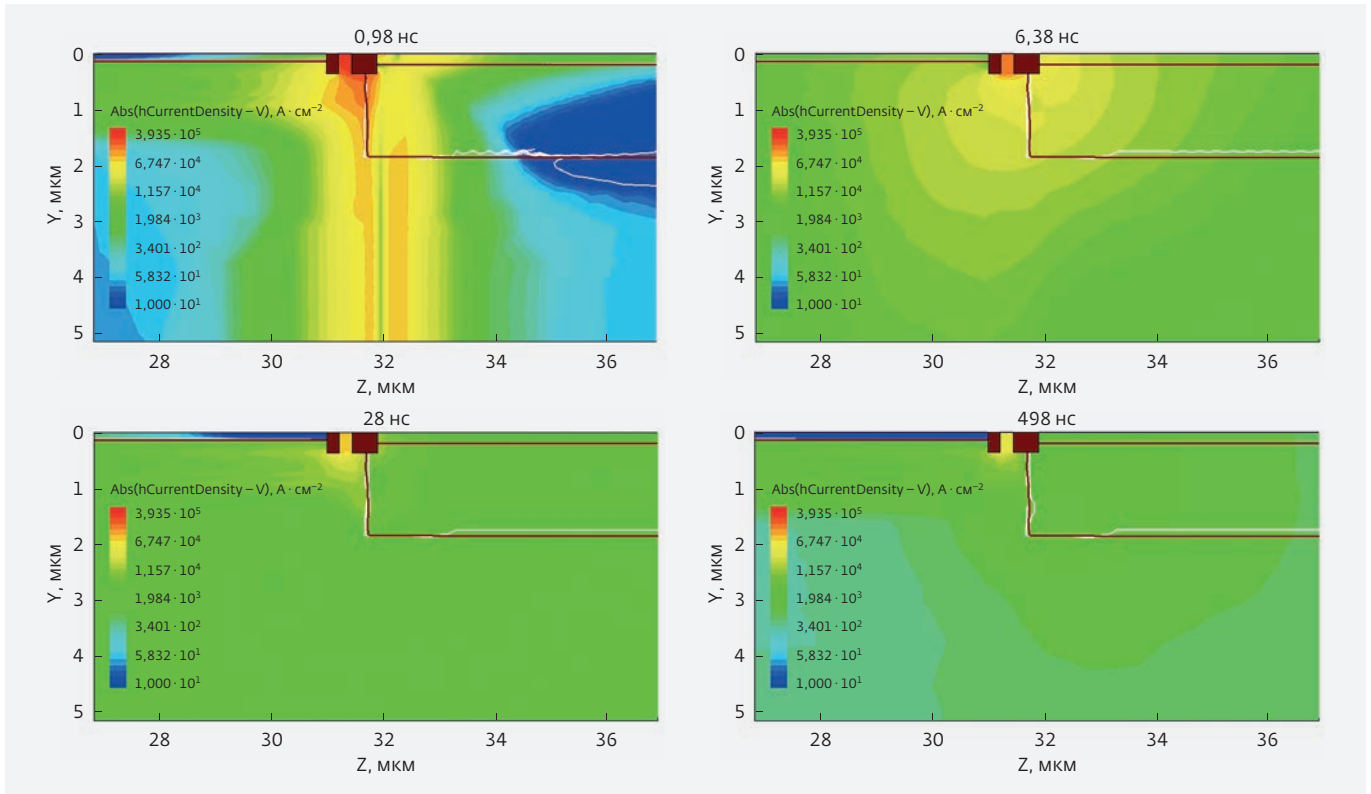


Рис. 5. Распределение дырок в структуре

Несмотря на то, что плотность электронов, текущих из p⁺-исток, становится малой вблизи границы между карманами спустя 498 нс, на расстоянии 10 мкм от этой границы ее величины достаточно для смещения р-п-перехода p-исток – р-карман в прямом направлении.

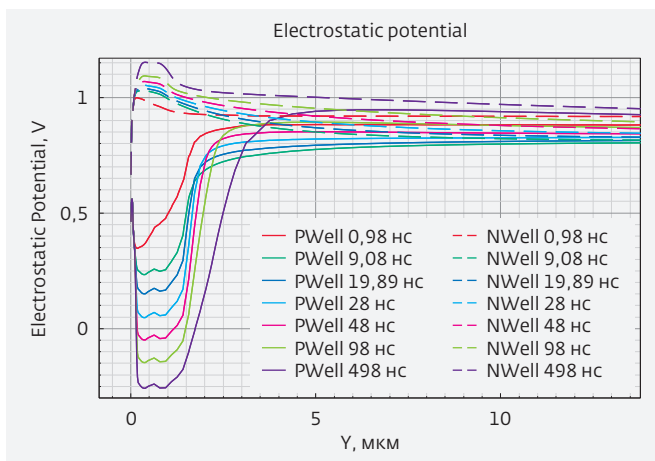


Рис. 6. Изменение потенциала в структуре со временем. L1 и L2 – глубины р-п-переходов p-исток – р-карман и p-исток – р-карман, соответственно

Из рис. 6 видно, что потенциал в р-кармане убывает со временем гораздо сильнее, чем возрастает потенциал в p-кармане, это связано с тем, что дырки уходят через р⁺-контакт быстрее, ввиду его расположения в центре структуры. На рис. 7 показано, что в структуре с указанной шириной каналов транзисторов возникает тиристорная защелка.

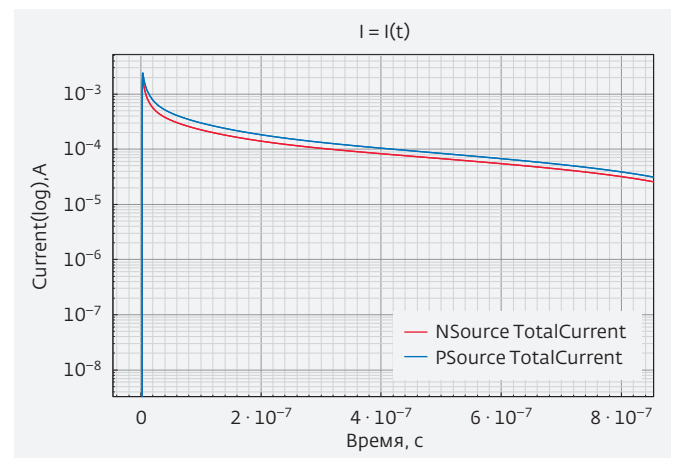


Рис. 7. Токовременная зависимость, показаны токи р- и p-источков

Краткий вывод по данной структуре

Результаты моделирования показали, что в структуре возникает и удерживается защелка, начиная с ширины p-канального транзистора, равной $W_n=24$ мкм. Данный вариант топологии является эффективным способом борьбы с защелкой, поскольку существенная часть дырок, сгенерированных частицей, и дырок, текущих из p^+ -истока, удаляется через контакт к r-карману, препятствуя повышению потенциала этого кармана и открытию паразитного биполярного p-p-транзистора.

Вариант № 2

Контакт к p-карману в центре структуры, к r-карману – с краю, при этом критические расстояния те же самые, что и для варианта № 1. Ниже последовательно приведены распределения электронов, дырок и токовременная зависимость на рис. 8, 9, 10 соответственно.

Из рис. 8 видно, что спустя 600 нс после падения ТЗЧ переход p^+ -исток – r-карман практически полностью закрывается, инжекция прекращается и тиристорная защелка исчезает. На рис. 9 показано распределение дырок в структуре, видно, что в области истока, близкой к контакту к r-карману,

инжекция дырок прекращается еще раньше. Данная ситуация практически аналогична ситуации с r-карманом в варианте № 1.

Из рис. 10 видно, что спустя 600 нс оба эмиттерных перехода начинают смещаться в обратном направлении, однако эмиттерный переход p-p-транзистора закрывается намного быстрее. Это связано с тем, что дырки, которые вытекают из правой части p^+ -истока (дальней относительно r-кармана), текут в r-карман через подложку под действием диффузии слишком медленно для удержания защелки. При этом в левой части p^+ -истока потенциал высокий ввиду расположения контакта к p-карману в центре структуры, и концентрация дырок там крайне мала (как можно видеть на рис. 9 спустя 78 нс после падения ТЗЧ). В связи с этим потенциал r-кармана начинает падать и переход p^+ -исток – r-карман закрывается, и, таким образом, прекращается положительная обратная связь в паразитной тиристорной структуре.

Краткий вывод по данной структуре

Результаты моделирования показывают, что данная структура более устойчива к защелке, чем в варианте топологии № 1. Тиристорный эффект

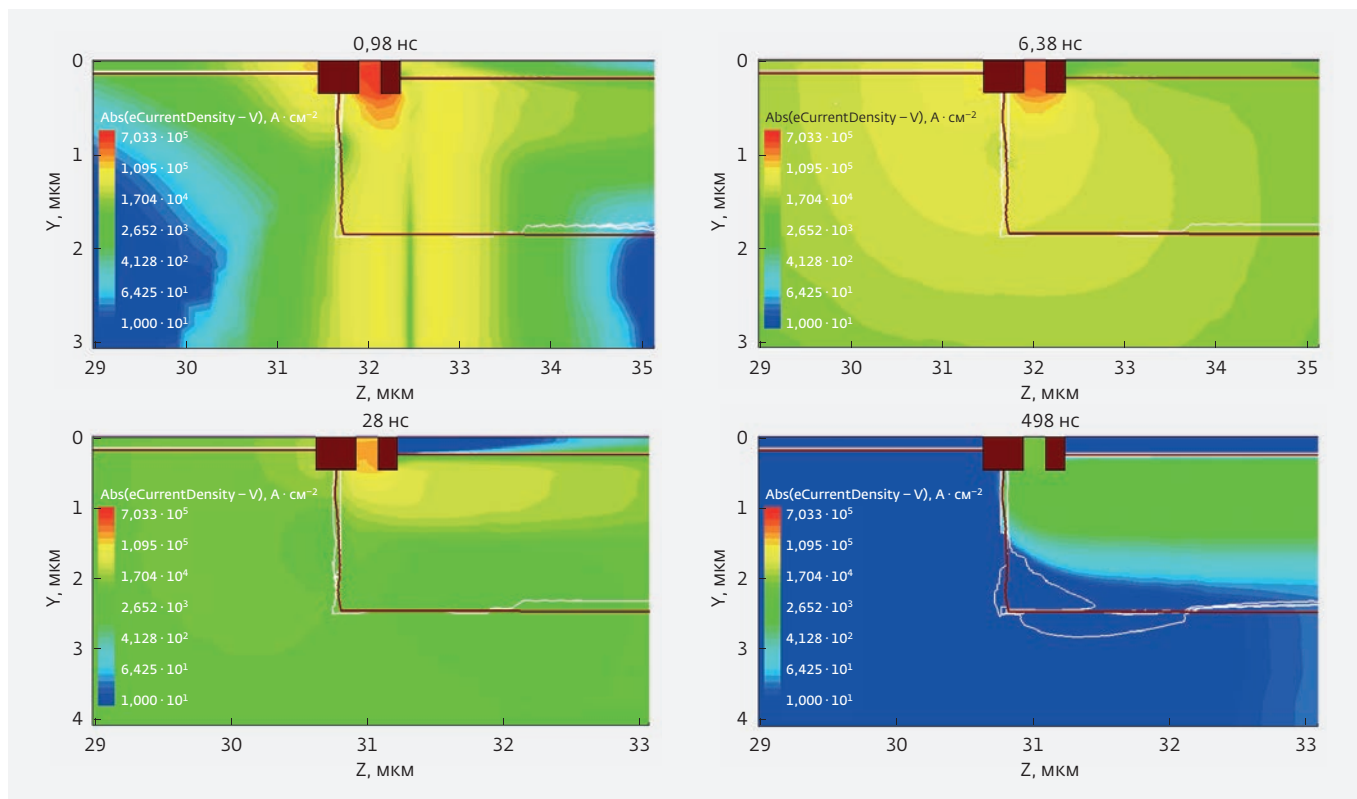


Рис. 8. Распределение электронов в структуре

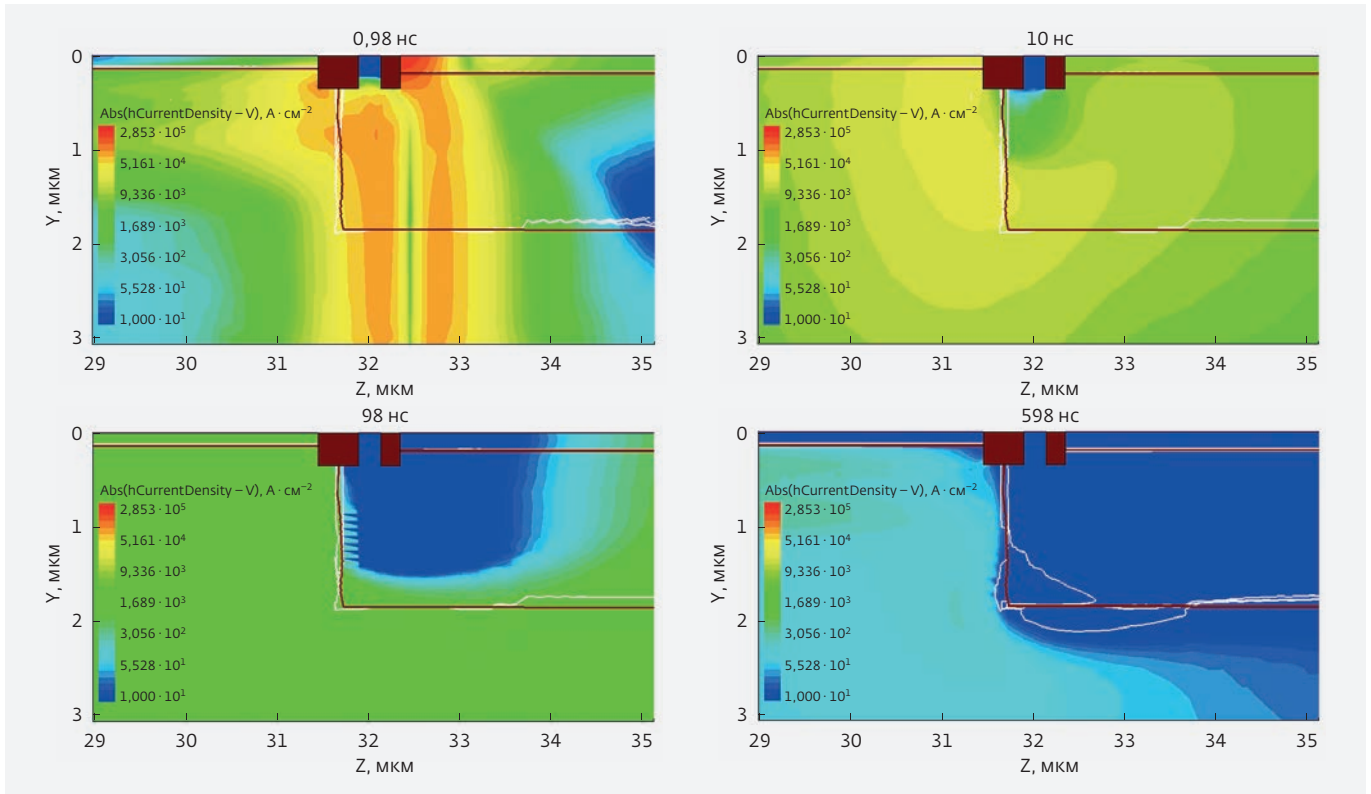


Рис. 9. Распределение дырок в структуре

не возникает вплоть до максимального значения ширины канала транзистора, которое использовалось при расчетах $W_n = 30$ мкм. Поскольку частица падает в исток р-канального транзистора, необходимо обеспечить эффективное удаление сгенерированных электронов через контакт к п-карману для того, чтобы потенциал п-кармана не понизился до значений, необходимых для открытия эмиттерного перехода р⁺-исток – п-карман паразитного БТ. Ввиду вышесказанного, разработчикам топологии рекомендуется контакт к п-карману располагать в центре структуры. При этом размещение контакта по варианту № 1 не дает желаемого результата по следующей причине: концентрация дырок, текущих из эмиттерного перехода р-п-р-транзистора вблизи границы между транзисторами велика ввиду того, что потенциал там достаточно низкий. Поэтому дыркам под действием диффузии для поддержания структуры в состоянии защелки необходимо преодолеть гораздо меньшее расстояние, чем в варианте топологии № 2. Таким образом, несмотря на наличие контакта к р-карману в центре структуры, в инверторе, выполненном по варианту топологии № 1, возникнет защелка, начиная со значений ширины транзистора, равных $W_n = 24$ мкм.

Если оба контакта к р-карману и п-карману находятся в центре инвертора, то можно добиться лучшей стойкости, однако вследствие правил проектирования для технологии с проектной нормой 90 нм площадь такого инвертора будет существенно выше. Таким образом, вариант структуры, в которой оба контакта к карманам находятся в центре

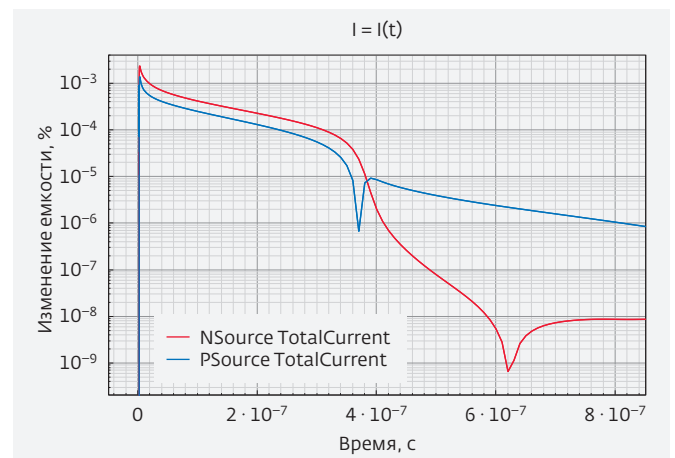


Рис. 10. Токовременная зависимость, показаны токи р- и п-истоков

структуры, является, безусловно, предпочтительным с точки зрения устойчивости к защелке, если отсутствуют ограничения на площадь рассмотренного инвертора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье было рассмотрено воздействие тяжелой заряженной частицы на элементы периферийных схем. В качестве простейшего элемента в среде Sentaurus TCAD была промоделирована структура инвертора. Расчеты показали, что восприимчивость структуры к защелке напрямую зависит как от расстояния между р- и п-канальными транзисторами, так и от ширины канала транзисторов.

С целью повышения стойкости инвертора были предложены два варианта топологии инвертора, в которых контакты к р- и п-карману поочередно располагались с краю и в центре структуры. В первом варианте топологии, где контакт к р-карману располагался в центре, результаты моделирования показали, что в структуре возникает и удерживается защелка, начиная с ширины канала п-МОПТ, равной $W_n = 24$ мкм. Данный вариант топологии является эффективным способом борьбы с защелкой, поскольку существенная часть дырок, сгенерированных частицей, и дырок, текущих из р⁺-истока, удаляется через контакт к р-карману, препятствуя повышению потенциала этого кармана и открытию паразитного биполярного п-р-п-транзистора.

Во втором варианте топологии, где контакт к п-карману располагался в центре структуры, а контакт к р-карману с краю структуры, тиристорный эффект не возникает вплоть до максимального значения ширины транзистора, которое использовалось при расчетах $W_n = 30$ мкм, ввиду чего данный вариант лучше первого. Различие в чувствительности к защелке объясняется распределением носителей и потенциалов в структуре со временем.

При отсутствии ограничения на площадь рассмотренного инвертора, вариант, в которой оба контакта к карманам находятся в центре структуры, является предпочтительным с точки зрения устойчивости к защелке.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чумаков А. И.** Действие космической радиации на ИС. – М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
2. **Красников Г. Я.** Исследование влияния материала верхнего электрода на свойства МДП структур // Диссертация к. т. н., Москва, 1989.
3. **Красников Г. Я., Шелепин Н. А.** Состояние и перспективы развития технологий и элемент-

ной базы СБИС с энергонезависимой памятью // В кн.: Проектирование систем на кристалле: тенденции развития и проблемы / Тезисы докладов, 2010. С. 55.

4. **Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М.** Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2014. 304 с.
5. **Dodds N. A.** Single event latchup: hardening strategies, triggering mechanisms, and testing considerations // Ph. D., Graduate School of Vanderbilt University, Nashville, TN. 2012. 130 p.
6. **Johnson A. H., Hughlock B. W.** Latchup in CMOS from single particles // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1990. P. 1886–1893.
7. **Bruguier G., Palau J.-M.** Single particle-induced latchup // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. P. 526–527.
8. **Voldman S.** Latchup // John Wiley & Sons, Ltd. 2007. 474 p.
9. **Панышев К. А., Парменов Ю. А.** Чувствительность к тиристорному эффекту КМОП-структуры с глубоким изолирующим п-карманом // Известия вузов. Электроника. 2017. Т. 22. № 3. С. 238–246.
10. **Панышев К. А., Парменов Ю. А.** Влияние угла и места падения тяжелой заряженной частицы на возникновение защелки в 90 нм КМОП технологии // Инновационная наука. 2015. Ч. 2. С. 95.
11. **Dinkins C. A.** Qualitative Characterization of Single-Event Transient and Latchup Trends in 180 nm CMOS Technology // MS Thesis, Graduate School of Vanderbilt University, Nashville, TN. 2011. 102 p.

НАНОЭДЬЮКАТОР II

Новое поколение учебно-научных комплексов
для преподавания основ нанотехнологии



Профессиональный подход к образованию в сфере нанотехнологии:

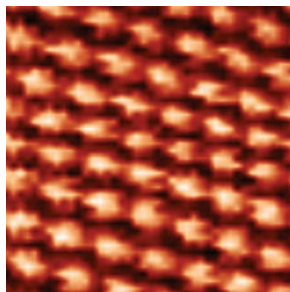
- Сканирующий зондовый микроскоп с АСМ и СТМ головками
- Полностью цифровой контроллер
- Сканер 100x100x10 мкм с емкостными датчиками
- Возможность получать разрешение вплоть до атомного при АСМ и СТМ исследованиях
- Возможность использовать АСМ-зонды кантилеверного типа

Комплект поставки включает:

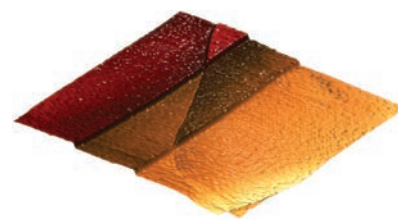
- Устройство заточки зондов
- Учебно-методические пособия
- Апробированный лабораторный практикум



*АСМ изображение
эритроцитов человека.
Размер скана 35x35 мкм*



*СТМ изображение
поверхности графита.
Размер скана 2x2 нм*



*СТМ изображение атомных
ступенек на графите.
Размер скана 800x800 нм*

Группа компаний НТ-МДТ Спектрум Инструментс

Центральный офис: 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд № 4922, дом 4, строение 3

E-mail: info@ntmdt-si.com; Тел.: +7 (499) 110-2050

Почтовый адрес: 124482, Москва, Зеленоград, корп. 317-А а/я 144, НТ-МДТ

ЭФФЕКТ ЛОКАЛЬНОГО ОТСУТСТВИЯ СИЛИЦИДА КОБАЛЬТА В КМОП-ТЕХНОЛОГИИ

► Р. А. Арилин¹, С. Н. Котекина¹, И. А. Коротова², А. Н. Поляков², А. А. Горбатов²

¹АО «НИИМЭ», ²ПАО «Микрон»

В работе рассматривается негативный физический эффект, возникающий при увеличении степени интеграции в узле формирования силицида кобальта. Показан технологический способ устранения негативного эффекта и полученные результаты в маршруте изготовления КМОП 90 нм.

THE EFFECT OF A LOCAL ABSENCE OF COBALT SILICIDE IN CMOS TECHNOLOGY

R. A. Arilin¹, C. N. Kotekina¹, I. A. Korotova², A. N. Polyakov², A. A. Gorbatov²

¹MERI SC, ²Mikron PJSC

The paper discusses the negative physical effect arising from the increasing degree of integration in the host formation of the silicide of cobalt. Shown technology the way to eliminate the negative effect and the results obtained in the route of manufacturing the CMOS 90 nm.

ВВЕДЕНИЕ

Уменьшение конструктивно-топологических ограничений в современной технологии изготовления ИС является одной из главных задач. Основным способом уменьшения размеров является масштабирование геометрических размеров типовых элементов транзистора и уменьшение плотности компоновки за счет разработки литографических процессов [1].

Кроме непосредственных задач, связанных с разработкой технологии, возникают проблемы, которые приводят к появлению негативных эффектов, ранее не видимых на уровне технологии до 180 нм.

Одним из таких негативных проявлений является эффект локального отсутствия силицида кобальта при переходе к технологии 90 нм и ниже.

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭФФЕКТА И ВЛИЯНИЕ НА СХЕМУ

При формировании областей «Защита от силицида» (далее обозначение SiProt-silicide protection) [2, 3] фотолитография проводится по резко непланарной структуре ИС. На данном этапе сформирована структура затвора и спейсеры, которые значительно уменьшают заложенный топологический зазор.

Минимальный зазор между шинами поликремния (half pitch) для технологии 180 нм составляет

около 300 нм. Для технологии 90 нм – уже около 120 нм.

На рис. 1 схематично показано сечение схемы с минимальными нормами перед фотолитографией «Защита от силицида» для технологии 180 нм (слева) и технологии 90 нм (справа).

При нанесении фоторезиста заполняет зазор. В технологии 180 нм экспонирование и проявление позволяет удалить фоторезист, так как aspectное соотношение достаточно большое. В технологии 90 нм фактический зазор превращается в капилляр с очень маленьким aspectным соотношением, и процесс фотолитографии (экспонирование – проявление – сушка) уже не обеспечивает удаление фоторезиста. На рис. 2 показан не удаленный остаток фоторезиста после завершения фотолитографии.

При последующем плазменном травлении фоторезист маскирует нижележащий слой $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{SiO}_2$. Во время химической обработки перед формированием силицида кобальта из некоторых зазоров непротяженной длины, происходит «подмывание» островков $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{SiO}_2$ и разлет их по кристаллу (рис. 3). Первый фактор негативного эффекта – генерация дефектов в схеме.

Второй фактор заключается в маскировании формирования силицида кобальта. В протяженных зазорах (рис. 4, 5) остаток $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{SiO}_2$ надежно зафикси-

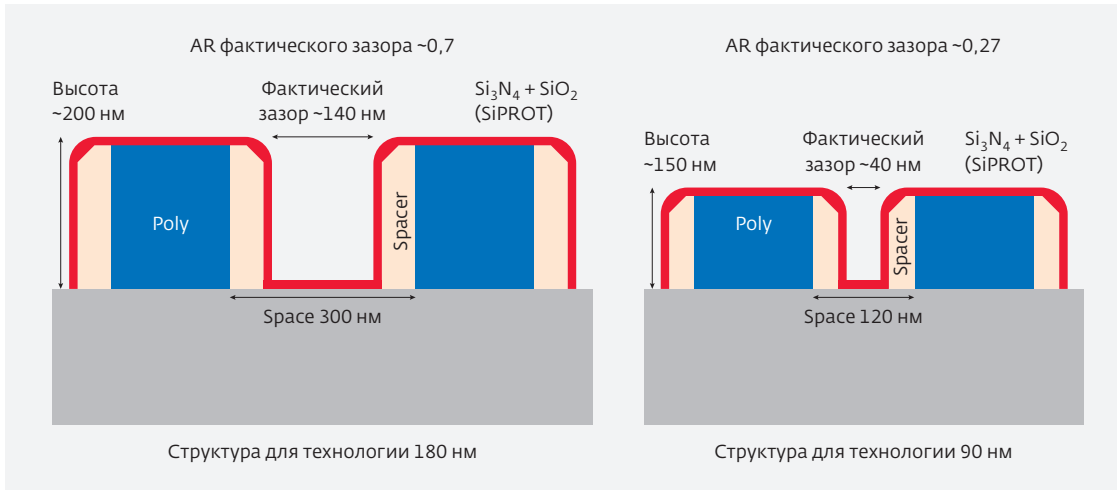


Рис. 1. Иллюстрация формирования фактического зазора и аспектные соотношения (AR) для двух технологий

рован, и он препятствует взаимодействию кобальта с кремнием.

Таким образом, в отдельных локальных областях схемы формируется область с высоким сопротивлением, что приводит к расхождению фактического результата на рабочей схеме относительно проектирования [4].

Физика данного негативного эффекта носит комплексную природу и связана с капиллярными явлениями. Зазор представляет собой тупиковый капилляр, в котором происходит взаимодействие двух жидкостей с разными коэффициентами вязкости (фоторезист и проявитель). Лимитирующий

реакцию механизм взаимодействия – диффузионный [5].

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

При решении данной проблемы перед нами стояли цели подобрать такие режимы для технологических процессов, чтобы исключить остатки фоторезиста, которые приводят к маскированию при последующем плазменном травлении, но без нарушения профиля рисунка и без изменения размеров фоторезистивной маски.

Первоначально проверялся способ удаления за счет подбора режимов фотолитографии (увели-

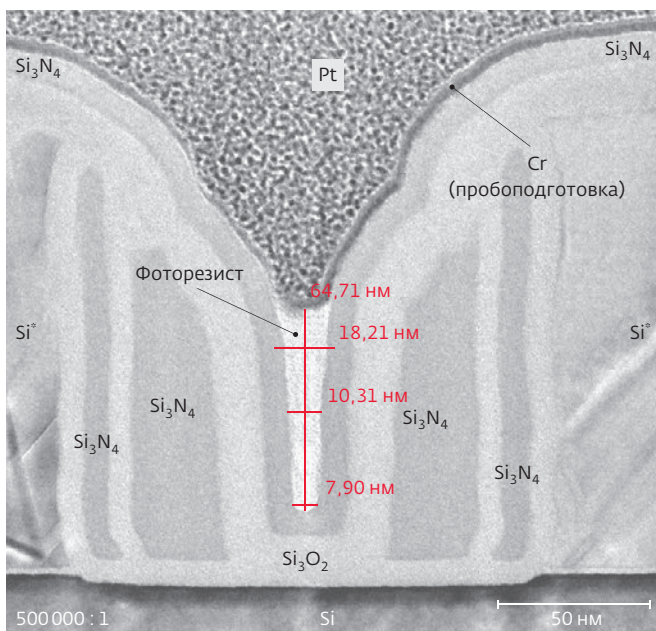


Рис. 2. ТЕМ-фото поперечного сечения структуры после процесса фотолитографии

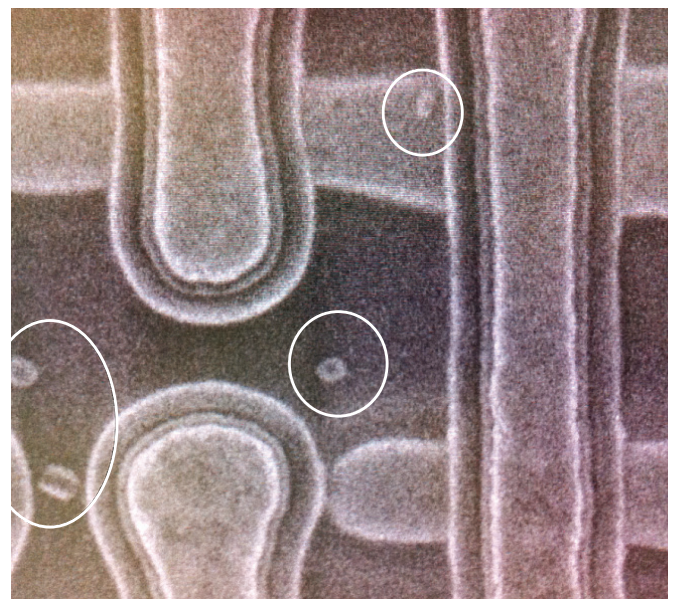


Рис. 3. SEM-фото дефектов перед осаждением PMD слоя изоляции. Видны дефекты на области STI и на области Active

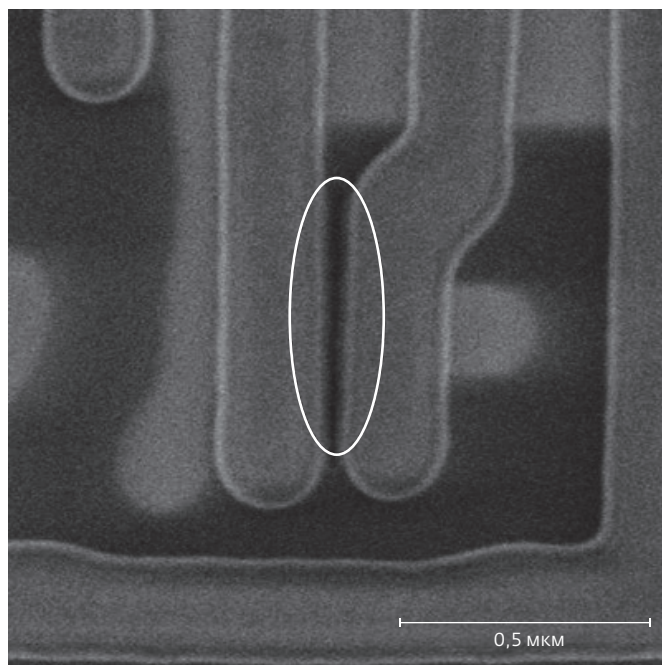


Рис. 4. SEM-фото. Остаток слоя SiProt в схеме, который блокирует образование силицида кобальта над активной областью

чение дозы экспонирования и времени проявления), но полностью и контролируемо проблему остатка фоторезиста не удалось решить. Подобранный режим приводил к значительному искажению фотолитографического рисунка за счет изменения размеров и сопутствующего искажения геометрии рисунка. Это подтверждает комплексную природу и сложность негативного эффекта.

Основным направлением работы являлась разработка такой плазменно-химической обработки (далее – зачистка) в среде кислорода, чтобы удалить остаток из узкого зазора, но без значительного искажения рисунка и без значительного уменьшения толщины фоторезиста.

В таблице показаны основные параметры разработанного режима.

Эксперимент заключался в формировании типовой фоторезистивной маски на рабочей пластине и последующей вариации времени, с контролем линейного размера на тестовом эле-

Таблица. Режим основного шага процесса зачистки на установке Axcelis Gemini ES

Мощность верхнего электрода, Вт	Давление, торр	Температура пластины, °С	Соотношение газовой смеси (O ₂ /N ₂ H ₂)
1 000	1	100	9 : 1

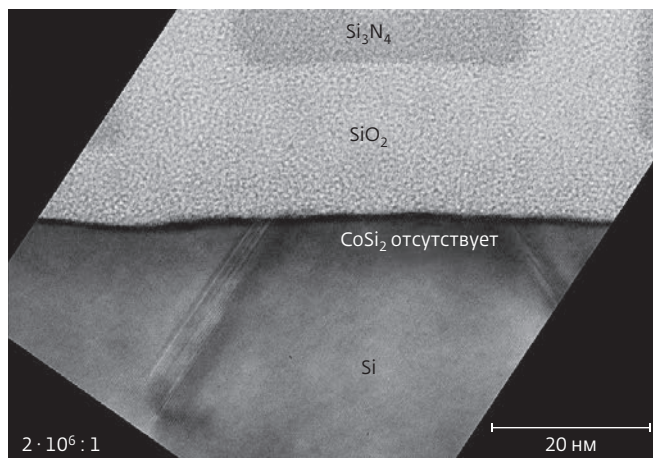


Рис. 5. TEM-фото, показывающее отсутствие слоя CoSi₂ в месте остатка фоторезиста

менте, а также проведением анализа структуры на HR-SEM-микроскопе для контроля толщины фоторезиста.

Далее в ходе эксперимента проводился подбор времени процесса, исходя из вертикального и горизонтального сноса фоторезиста, при удалении остатка из узкого зазора. На рис. 6 видно, что зависимость имеет нелинейный характер.

При зачистке линейный размер фоторезистивной маски уменьшается. Из приведенных данных мы можем видеть, что в первые 20 с снос фоторезиста максимален. Скорость (в первые 20 с) составляет 1,1 нм/с. Далее скорость падает: за первую минуту до 0,3 нм/с. Более 90 с зачистки дает скорость, равную 0,2 нм/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Все эксперименты по удалению фоторезиста из узких зазоров между поликремнием, кроме введения операции ПХ-зачистки, не дали положительных производящих результатов.

Снос фоторезиста с вертикальной поверхности при максимальном времени зачистки (120 с) только за зачистку составил 45 нм. Для удаления фоторезиста из зазоров между поликремнием требуется удаление 60–80 нм, те 120 с – недостаточное время для полного удаления фоторезиста.

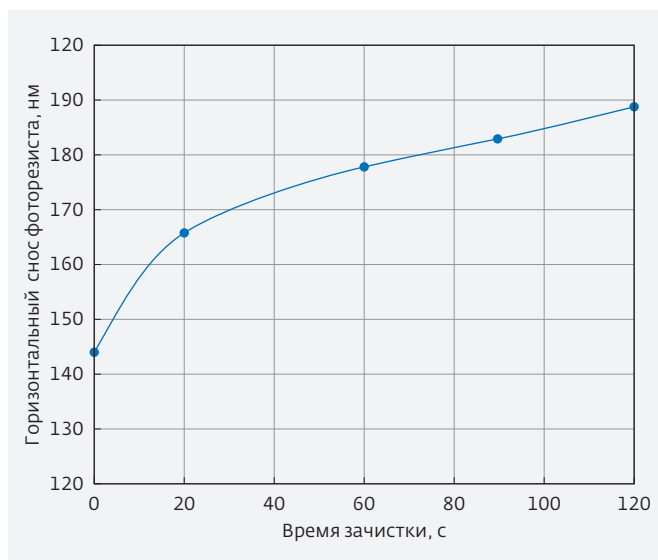


Рис. 6. График зависимости сноса фоторезиста с горизонтальной поверхности от времени проведения процесса

Снос фоторезиста с вертикальной поверхности при зачистке происходит в первые 20 с обработки (скорость более 1 нм/с), далее скорость падает в 2–3 раза. Та зависимость сноса фоторезиста от времени зачистки имеет скорее экспоненциальный вид, чем линейный (рис. 6).

Замеры остатков фоторезиста по бокам также показывают, что скорость удаления фоторезиста – до 1 нм/с (за 120 с ушло 80 нм по сколам и 100 нм – по CD-замерам). При увеличении времени зачистки боковой запас фоторезиста будет сохраняться примерно до времени обработки 250 с (рис. 7).

Таким образом, чтобы решить проблему остатков фоторезиста в узких зазорах поликремния, необходимо увеличивать время зачистки. На последующих экспериментальных пластинах был проведен набор времен зачистки 140 с – 200 с – 250 с с контролем значения CD после зачистки (перед плазмохимическим травлением) и проверяли наличие фоторезиста в зазорах.

Положительный результат дало время зачистки не менее 130 с и не более 160 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены экспериментальные и теоретические результаты по разработке технологического режима, направленных на устранение эффекта

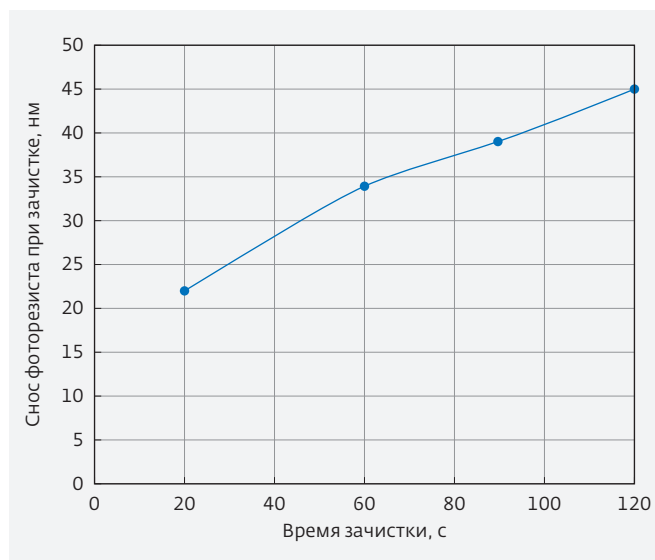


Рис. 7. График зависимости уменьшения размера (снос с вертикальной поверхности) в зависимости от времени проведения процесса

остаточного фоторезиста в узких зазорах для технологии 90 нм.

Экспериментальная партия, изготовленная с применением рассматриваемой операции по маршруту КМОП 90 нм, показала увеличение процента выхода годных за счет устранения дефектности и улучшения стабильности параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. International Technology Roadmap for Semiconductor, <http://public.itrs.net>
2. **Красников Г. Я., Зайцев Н. А.** Нанoeлектроника: состояние, проблемы, и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 1. С. 2–5.
3. **Красников Г. Я., Лукаевич М. И., Морозов В. Ф., Савенков В. Н.** Способ изготовления БИКМОП прибора. // Патент на изобретение RUS 2141148, 1998
4. Posseme Nicolas. Protection method for protecting a silicide layer. United States Application US20160240371, 18.08.2016.
5. **Вонг Б. П., Миттал А., Цао Ю., Старр Г.** Нано-КМОП-схемы и проектирование на физическом уровне / Пер. с англ. К. В. Юдинцева; под ред. Н. А. Шелепина. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. 432 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ МИКРОМОДУЛЕЙ НА ГИБКОЙ КОММУТАЦИОННОЙ ПЛАТЕ

► Ю. Г. Долгов¹, А. И. Погалов², Г. А. Блинов¹

¹ЗАО «НИИМП-Т», ²МИЭТ

Создана технология изготовления микромодулей на основе бескорпусных многовыводных больших интегральных схем (БИС) с шариковыми выводами, смонтированных на гибкой плате. Проведено моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) материалов микромодуля и исследовано влияние размера шариковых выводов на прочность и долговечность. Проведены испытания микромодулей. Даны рекомендации по проектированию микромодулей.

RESEARCH AND DEVELOPMENT TECHNOLOGY FOR CREATING MICROMODULES ON A FLEXIBLE COMMUTATION BOARD

Yu. G. Dolgovykh¹, A. I. Pogalov², G. A. Blinov¹

¹NIIMP-T CJSC, ²MIET

The technology of manufacturing micromodules based of uncased multiconnection large-scale integrated circuits (LSI) with ball conclusions is mounted on a flexible board. Modeling stress-strain state (SSS) materials of the micromodule was carried out and the influence of the size ball conclusions on the strength and durability was investigated. Micromodules were tested. Recommendations for design of micromodules are given.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка микромодулей на основе технологии сборки и монтажа бескорпусных микросхем на гибкую плату является на сегодняшний день одним из совершенных конструктивно-технологических решений по микроминиатюризации электронных изделий. Гибкость подложек позволяет создавать пространственные трехмерные структуры с высокой плотностью компоновки. Такое техническое решение позволяет обеспечить высокую плотность и надежность монтажа, оптимальные массогабаритные характеристики изделия [1–3].

В процессе производства, испытаний и эксплуатации все изделия микроэлектроники подвергаются различным внешним воздействиям (ВВ), которые могут приводить к параметрическим и катастрофи-

ческим отказам. Любое механическое, тепловое или климатическое воздействие приводит к возникновению в элементах микроэлектронной аппаратуры (МЭА) механических напряжений. При проектировании и создании микромодулей учитывались требования по минимизации напряженно-деформированного состояния (НДС) материалов изделия для повышения ресурса эксплуатации не менее 10 лет.

Бескорпусные многокристальные модули с применением гибких плат характеризуются своей компактностью и безотказностью в работе. Такие конструкции имеют хорошую ремонтпригодность, плотность упаковки, способные выдерживать без разрушения статические, динамические нагрузки и термомеханические воздействия.

КОНСТРУКЦИЯ, СПОСОБ МОНТАЖА И ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МИКРОМОДУЛЕЙ

Конструкция микро модуля показана на рис. 1. Геометрические размеры в плане 10×10 мм. Толщина кристалла кремния (Si) и печатной платы (ПП) по 500 мкм, толщина полиимидной пленки (ПМ) 50 мкм, диаметр припойных выводов 300...500 мкм, диаметр золотого шарикового вывода (d_B) 60...100 мкм. Разработана технология создания БИС с шариковыми выводами, которые формируются непосредственно на контактных площадках (КП) кристалла. Кристалл после проведения аттестации монтируется сразу на гибкую плату [4]. На верхней стороне гибкая коммутационная полиимидная плата имеет КП для монтажа золотых шариковых выводов кристалла. На другой стороне платы в полноматричном исполнении сформированы монтажные припойные выводы из легкоплавкого припоя для распайки и установки микро модуля на внешние устройства.

Для конструктивно-технологического решения изготовления БИС с шариковыми выводами на гибкой плате в составе микро модулей и с использованием положительных результатов проведенных исследований разработан технологический маршрут (рис. 2), который обеспечивает повышение плотности упаковки, увеличение производительности за счет использования группо-

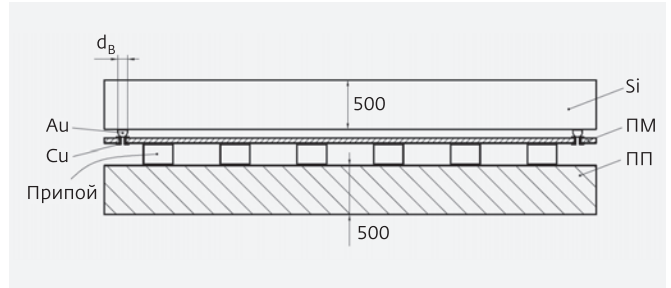


Рис. 1. Конструкция микро модуля с установленными бескорпусными БИС с шариковыми выводами на гибкой плате

вой технологии и автоматизированных методов монтажа БИС на гибких платах. Выбор однородных материалов изделий, их механическая и физико-химическая совместимость обоснованы по критериям прочности, жесткости, согласованы по модулю упругости, температурным коэффициентам линейного расширения. Рациональные конструктивные параметры определены на ранних этапах проектирования с помощью моделирования и инженерных расчетов с использованием критериев прочности, функциональности, технологичности [5].

Изготовленный образец микро модуля со смонтированными бескорпусными БИС с шариковыми выводами на гибкой плате представлен на рис. 3.

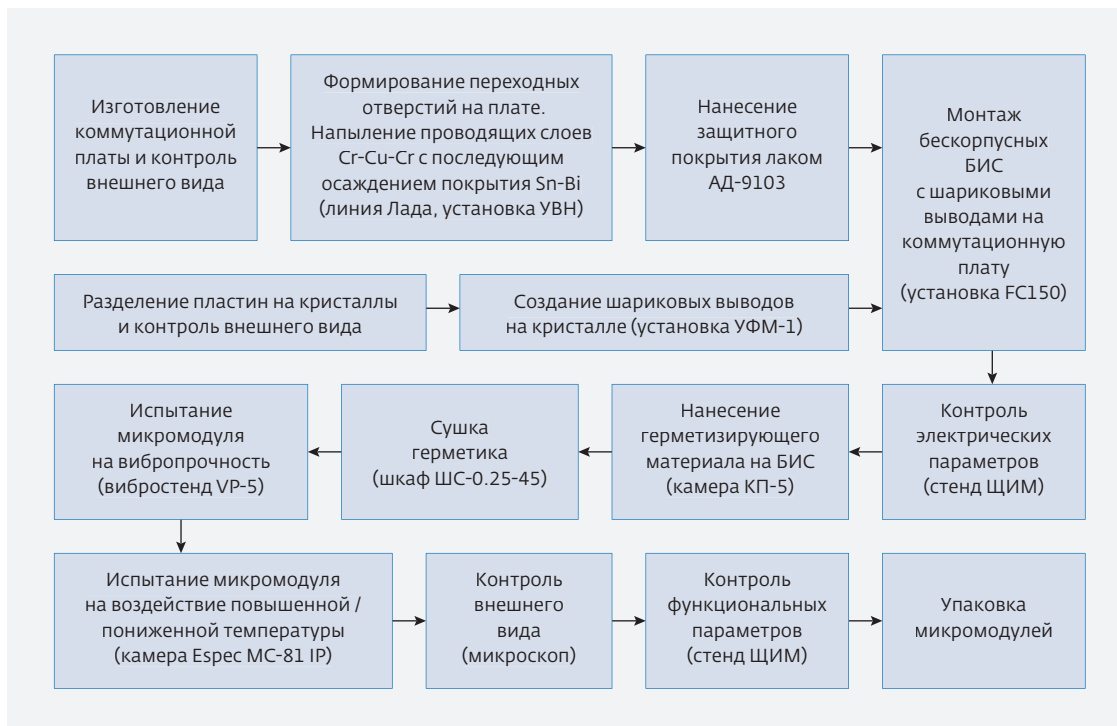


Рис. 2. Структурная схема технологического процесса изготовления БИС с шариковыми выводами на плате

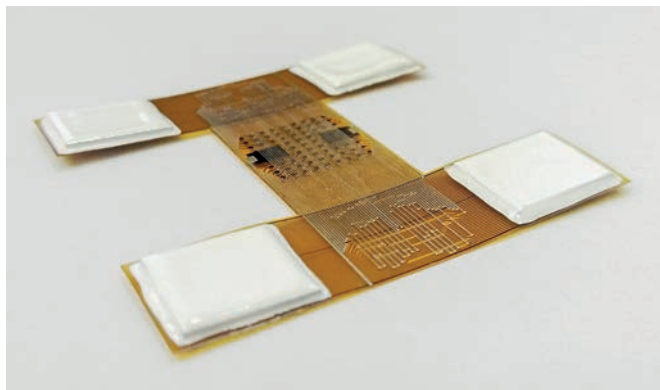


Рис. 3. Образец микро модуля с установленными бескорпусными БИС с шариковыми выводами на гибкой плате и защищенным компаундом

МОДЕЛИРОВАНИЕ. НДС МАТЕРИАЛОВ МИКРОМОДУЛЯ

Современный подход к проектированию микро модулей на гибкой коммутационной плате требует применения численных методов и компьютерного моделирования. В проводимых исследованиях используется программно-вычислительный комплекс на основе метода конечных элементов [6–7]. С целью обоснованного выбора размеров шариковых выводов были разработаны три варианта модели трехмерного микро модуля с конечно-элементной дискретизацией с величиной диаметра вывода $d_0 = 60$ мкм (вариант 1), 80 мкм (вариант 2) и 100 мкм (вариант 3). Физико-механические и теплофизические свойства используемых материалов микро модуля приведены в табл. 1. Результаты моделирования максимальных эквивалентных напряжений по теории энергии формоизменения в материалах для трех вариантов представлены в табл. 2.

Таблица 1. Физико-механические и теплофизические свойства материалов микро модуля

Материал	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона μ	ТКЛР $\alpha \cdot 10^6$, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	Допускаемые напряжения σ , МПа	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)
Кремний	$1,3 \cdot 10^5$	0,3	4,2	200	100
Золото	$0,8 \cdot 10^5$	0,42	14	300	300
Полиимид	$3 \cdot 10^3$	0,3	20	150	0,3
Медь	$1,2 \cdot 10^5$	0,35	16,5	150	300
Припой	$0,46 \cdot 10^5$	0,36	23	40	60

Проведенные исследования показали, что увеличение диаметра золотых шариковых выводов с 60 до 100 мкм приводит к снижению напряжений в золоте в 2 раза, в кристалле кремния – в 1,85 раза, в медной металлизации – в 2,25 раз и увеличению нагрузки на монтажные припойные выводы – в 1,5 раза. Основной причиной отказа материалов межсоединений конструкции является термомеханическая малоцикловая усталость, которую оценивали по критериям Коффина – Мэнсона [5]. Наиболее слабым элементом конструкции являются припойные выводы. Для легкоплавких припоев использовали критерий оценки долговечности (N циклов) по величине амплитуды угловой деформации γ припоя в виде

$$\gamma N^n = c, \quad (1)$$

где n , c – опытные коэффициенты.

Опытным путем установлены коэффициенты критерия долговечности $n = 1,214$ и $c = 27,08$ для припоя ПОВи.

Критерий имеет следующий вид:

$$\gamma N^{1,214} = 27,08. \quad (2)$$

При моделировании напряженно-деформированного состояния припойных выводов установлены следующие величины амплитуды угловых деформаций: 1 вариант – $\gamma_1 = 0,5 \cdot 10^{-4}$; 2 вариант – $\gamma_2 = 0,52 \cdot 10^{-4}$; 3 вариант – $\gamma_3 = 1,15 \cdot 10^{-5}$.

С использованием уравнения (2) определена долговечность припойных выводов при циклическом нагреве на 40°C : 1 вариант – $N_1 = 52840$; 2 вариант – $N_2 = 51160$; 3 вариант – $N_3 = 177306$.

Таблица 2. Результаты моделирования максимальных напряжений в материалах микромодулей в МПа для трех вариантов моделей

Материал	Вариант 1 $d_b=60$ мкм	Вариант 2 $d_b=80$ мкм	Вариант 3 $d_b=100$ мкм
Золото	395	349	200
Кремний	253	181	137
Медь	247	175	110
Полиимид	28,9	30,4	28,8
Припой	26,2	25	37

Зависимость максимальных напряжений и угловых деформаций сдвига в припое от диаметра золотого шарика вывода представлена на рис. 4. Эти зависимости имеют экстремум (минимум) при диаметре шарикового вывода $d_b=80$ мкм. При увеличении диаметра до $d_b=100$ мкм напряжения в припое повышаются с 25 до 37 МПа (в 1,5 раза), угловые деформации сдвига в припое повышаются с $\gamma=0,5 \cdot 10^{-4}$ до $\gamma=1,15 \cdot 10^{-5}$ (в 2,3 раза).

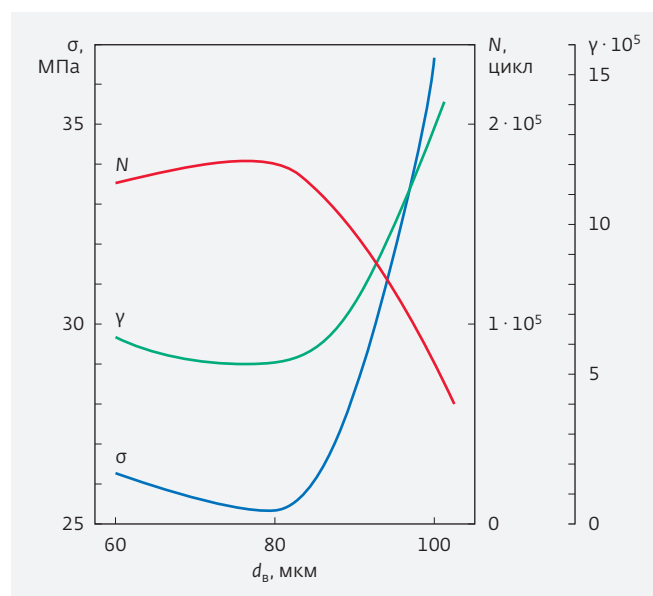
С использованием данных угловых деформаций сдвига γ и критерия долговечности припоя $\gamma N^{1,214}=27,08$, где опытные коэффициенты получены нами экспериментально для припоя марки ПОВИ, получена зависимость долговечности от величины диаметра шарикового вывода $N=f(d_b)$ (рис. 4). Эта зависимость имеет экстремум (максимум) при $d_b=80$ мкм, где долговечность припоя составит $N=1,77 \cdot 10^5$ циклов и в 3,6 раза выше долговечности при $d_b=100$ мкм.

ИСПЫТАНИЯ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИИ И ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЕ

Были изготовлены образцы микромодулей, которые испытывались на вибропрочность для проверки способности изделий противостоять разрушающему действию вибрации. Затем образцы испытывались на воздействие повышенной и пониженной температуры, чтобы определить способность изделий сохранить внешний вид. Термоциклирование является одним из самых жестких видов климатических испытаний и позволяет выявить скрытые конструктивные дефекты и дефекты технологии, определить прочность микросоединений. Внешний вид, качество обработки, отделки и рисунка коммутации образцов определяли визуально и с использованием микроскопа. Визуальный осмотр образцов проводили с помощью микроскопа МБС-10. Созданные образцы микромодулей испытывались на

вибропрочность с применением вибростенда VP-5 по методу качающейся частоты в частотном диапазоне 10...5000 Гц и ускорении 40 g (ГОСТ 16962-71, XIV степень жесткости). Микромодули испытывались на воздействие повышенной температуры в диапазоне от 20 до 70 °C (ГОСТ 30630.2.1, ГОСТ 28209, ст. МЭК 68-2-14-84, VI степень жесткости), затем в диапазоне температур от -60 до 120 °C с выдержкой в термокамере Espes MC-811P в течение 2 ч.

Проведенные испытания показали, что микромодули характеризуются высокой стабильностью и вибропрочностью. В процессе испытаний отслоений проводников и контактных площадок, коротких замыканий между уровнями коммутации не обнаружено.

**Рис. 4.** Зависимость максимальных напряжений, угловых деформаций и долговечности припоя от диаметра золотого шарикового вывода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения эксплуатационной надежности микромодулей необходим расчет и моделирование напряженно-деформированного состояния материалов микромодуля и рациональный выбор конструктивных параметров. Наилучшие результаты достигаются при выборе диаметра золотых шариковых выводов 80 мкм, что позволило уменьшить напряжения в припойных выводах в 1,5 раза и повысить циклическую долговечность в 2,3 раза.

Разработанная технология создания бескорпусных многовыводных БИС с шариковыми выводами прошедших аттестацию и смонтированных на гибкой коммутационной плате в составе микромодулей, позволяет обеспечить большую плотность упаковки, значительно уменьшить массу и габариты изделия. Микромодули по результатам испытаний на воздействие вибрации и термоциклирование показали возможность их применения в системах и устройствах бортовой аппаратуры космических аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

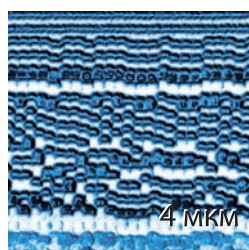
1. **Гуськов Г. Я., Блинов Г. А., Газаров А. А.** Монтаж микроэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1986. 176 с.
2. **Медведев А. М.** Сборка и монтаж электронных устройств. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2007. 256 с.
3. **Стоянов А. А., Побединский В. В., Рогозин Н. В., Рембеза С. И.** Особенности монтажа кристаллов с использованием технологии «flip-chip» при сборке 3D БИС // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 9-1. С. 62-64.
4. **Грушевский А. М., Погалов А. И., Блинов Г. А., Долговых Ю. Г.** Исследование напряженно-деформированного состояния материалов бескорпусных многовыводных интегральных схем с шариковыми выводами // Известия вузов. Электроника. 2009. № 4 (78). С. 3-8.
5. **Долговых Ю. Г., Погалов А. И., Блинов Г. А.** Технология монтажа и методы оценки долговечности бескорпусных БИС с шариковыми выводами на гибкой коммутационной плате // Проектирование и технология электронных средств. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. № 1. С. 51-54.
6. **Кузнецов О. А., Погалов А. И., Сергеев В. С.** Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1990. 144 с.
7. **Норенков И. П.** Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 448 с.

VEGA

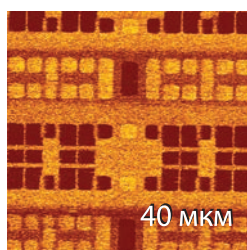
Передовые методы атомно-силовой микроскопии высокого разрешения для большеразмерных образцов



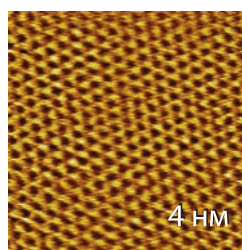
- АСМ ВЕГА разработан для исследований поверхности полупроводниковых пластин, магнитных носителей, литографических масок и других образцов.
- Прибор интегрирован в акусто- и виброизолирующий кожух с системой термостабилизации, позволяя уверенно получать изображения с атомным разрешением.
- Обеспечивается контроль образцов до 200×200 мм с 1 мкм точностью позиционирования зонда в любой точке поверхности.
- Доступны все современные методы АСМ для изучения наномеханических, электрических и магнитных свойств.
- Экспертная система Smart ScanTronick™ позволяет осуществлять сканирование с оптимальными параметрами независимо от уровня квалификации пользователя.



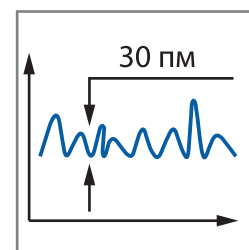
Магнитные
домены
в 1 ТБ НЖМД



Поверхностный
потенциал
в SRAM



Атомное
разрешение
на графите



Шум по Z

Группа компаний НТ-МДТ Спектрум Инструментс

Центральный офис: 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд № 4922, дом 4, строение 3

E-mail: info@ntmdt-si.com; Тел.: +7 (499) 110-2050

Почтовый адрес: 124482, Москва, Зеленоград, корп. 317-А а/я 144, НТ-МДТ

К НАУЧНОМУ ПРИБОРОСТРОЕНИЮ ДЛЯ НАНОТЕХНОЛОГИИ: СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

► В. А. Быков^{1, 2, 3}, В. В. Поляков¹, А. С. Калинин¹, А. В. Шелаев¹

¹ООО «НТ-МДТ», ²МФТИ (ГУ), ³НОР

Изложены исторические корни зарождения и развития молекулярной нанотехнологии в России, дальнейшее развитие которой потребовало создания специальных приборов – сканирующих зондовых микроскопов. Изложены основные этапы развития сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии нанометрового пространственного разрешения. Приводятся новые конструкции, контроллеры, режимы работы приборов, которые радикально расширяют их аналитические опции; показаны новые разработки микромеханических систем для СЗМ и тенденции их развития.

SCIENTIFIC INSTRUMENTS FOR NANOTECHNOLOGY: SCANNING PROBE MICROSCOPY

V.A. Bykov^{1, 2, 3*}, V.V. Polyakov¹, A.S. Kalinin¹, A.V. Shiriaev¹

¹NT-MDT, ²MIPT, ³NtSR

The historical roots of the birth and development of molecular nanotechnology in Russia are outlined, the further development of which required the creation of special instruments – scanning probe microscopes. The main stages of the development of scanning probe microscopy and nanoscale spatial resolution spectroscopy are described. New designs, controllers, modes of operation of devices are presented, which radically expand their analytical options; New developments of micromechanical systems for SPM and trends of their development are shown.

ВВЕДЕНИЕ

В СССР работы в области молекулярной нанотехнологии проводятся с 1974 года в НИИФП им. Ф. В. Лукина Министерства электронной промышленности СССР с изучения возможностей технологии на основе пленок Ленгмюра – Блоджетт. Программа работ заинтересовала большое число ведущих ученых СССР. Ниже перечислена большая часть соисполнителей программы и отмечены ключевые результаты:

- Институт кристаллографии АН СССР (акад. Б. К. Вайнштейн, проф. Л. М. Блинов, проф. М. В. Ковальчук, проф. Ю. М. Львов, проф. Л. А. Фейгин, д. ф. - м. н. Б. И. Островский), где проводились рентгеноструктурные исследования ЛБ-пленок методами малоуглового рассеяния рентгеновских лучей и спектроскопии стоячих рентгеновских волн, развивались методы исследова-

ования биомолекул, были выполнены работы по фотоиндуцированным структурным перестройкам в ЛБ-пленках;

- Институт спектроскопии АН СССР (проф. Р. И. Персонов, проф. Г. Н. Жижин), где проводились работы по низкотемпературной электронной спектроскопии и ИК-спектроскопии, в том числе методами спектроскопии поверхностных волн;
- Институт биофизики АН СССР (проф. П. И. Лазарев), где разрабатывалась возможность построения функциональных элементов одноэлектронных приборов;
- Институт радиоэлектроники АН СССР (акад. Ю. В. Гуляев, проф. В. В. Кислов), где проводились исследования электрических свойств ЛБ-пленок и совместно с лабораторией В. И. Панова были выполнены первые работы

- по туннельной и атомно-силовой микроскопии ЛБ-пленок жирных кислот;
- Институт химической физики АН СССР (проф. М.В. Алфимов, проф. В.Л. Тальрозе), где исследовались фотохимические эффекты в ЛБ-пленках;
 - Институт общей физики АН СССР (акад. А.М. Прохоров, проф. В.В. Савранский, А.С. Алексеев), где исследовалась возможность создания биосенсоров на ЛБ-пленках, выполнена серия работ по фотоиндуцированным электронным переходам в ЛБ-пленках;
 - Институт неорганических и элементоорганических соединений АН СССР (проф. А.М. Сладков, акад. А.В. Фокин, проф. В.А. Никаноров, И.Р. Гольдинг), где разрабатывались новые методы синтеза поверхностно-активных полисопряженных олигомеров на основе кремний и германий органических соединений, сополимеры на основе цианакрилатов, хлорбутадиенов, элементоорганических соединений;
 - Томский институт органической химии СО АН СССР (проф. Ю. Кряжев), где разрабатывались методы синтеза поверхностно-активных полимерных и олигомерных соединений с включением полисопряженных фрагментов, в том числе варианты структур типа лестничных полимеров;
 - Московский государственный университет, факультеты: химический (проф. В.Н. Измайлова, проф. С.Д. Варфоломеев), где проводились работы по химическому и биохимическому синтезу сложных молекул, исследованию их физико-химических свойств; физический (проф. А.Б. Рубин, проф. О.А. Акципетров), где проводились работы по нелинейной оптике ЛБ-пленок; биологический (проф. Л.Б. Рубин, проф. И. Иванов, проф. А.А. Кононенко, Е.П. Лукашев, проф. В. Пшецкий), где проводились работы по выделению и очистке цитохромов, бактериородопсинов, пурпурных мембран of Halobacteria, построению сенсорных структур и структур с оптической памятью на их основе;
 - Ленинградский государственный университет (проф. А.В. Тулуб, проф. И.В. Аборенков, проф. В.Ф. Братцев, проф. С.Г. Семенов), где проводились расчеты электронных спектров молекул и получаемых из них структур на основе ЛБ-пленок;
 - Московский химико-технологический институт им. Д.И. Менделеева (проф. В.Ф. Травень, проф. Ю. Фролов), где разрабатывались методы синтеза и очистки целого ряда новых поверхностно-активных веществ;
 - Московский текстильный институт им. А.Н. Косыгина (проф. М.-Г.А. Швехгеймер, Г.С. Станкевич), где разрабатывались методы синтеза и очистки ряда поверхностно-активных веществ различных соединений (октадецилфенол), вещества для фибриллярных лиотропных жидких кристаллов;
 - Калининский государственный университет (проф. Ю. Папулов, проф. П. Халатур), где разрабатывались методы молекулярной динамики и проводился расчет процессов самосборки в ЛБ-пленках;
 - Ивановский государственный университет (проф. А.И. Александров, Л.А. Валькова), где проводились структурные исследования ЛБ-пленок и ориентированных пленок из лиотропных жидких кристаллов;
 - Горьковский государственный университет (акад. Г.А. Разуваев), где разрабатывались методы синтеза и очистки поверхностно-активных элементоорганических соединений и полупродуктов;
 - Ивановский химико-технологический институт (проф. М.И. Альянов, проф. В. Бородкин), где разрабатывались методы синтеза и очистки поверхностно-активных фталоцианинов и водорастворимых фталоцианинов для получения лиотропных жидких кристаллов;
 - Научно-исследовательский институт органических полупродуктов и красителей (проф. Л.М. Блинов, проф. В.В. Титов, М.И. Барник, проф. Г.Н. Ворожцов, проф. Е.А. Лукьянец, Е.И. Ковшов, Хан Ир Гвон, С.Г. Юдин), где разрабатывались методы синтеза поверхностно-активных фталоцианинов и порфиринов, фотохромных ПАВ, поверхностно-активных азосоединений, различных соединений для получения лиотропных жидких кристаллов;
 - Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений (проф. В. Миронов), где проводились работы по разработке методов и синтезу поверхностно-активных кремний органических соединений, карборанов, адамантанов и других элементоорганических соединений для ЛБ-технологии;
 - Всесоюзный заочный институт пищевой промышленности (проф. А. Зимон), где проводились разработки методов синтеза и очистки поверх-

- ностно-активных краунэфиров, в том числе полимерных, изучались адгезионные свойства этих пленок на различных поверхностях;
- Академия химической защиты МО СССР (проф. Ю. Студнев), где синтезировались поверхностно-активные перфторорганические соединения;
 - Рижский политехнический институт (проф. О. Я. Нейланд, В. Ходорковский), где синтезировались поверхностно-активные донорные и акцепторные соединения на основе тиафульваленов и цианхиноидов;
 - Институт органической химии Латвийской АН (проф. Я. Фрейманис), где синтезировались поверхностно-активные автокомплексы;
 - Рижский физико-энергетический институт (проф. Э. Силиньш), где исследовались поверхностно-активные свойства ряда ароматических дифильных соединений, формировались ЛБ-пленки и производились исследования их электрических и фотоэлектрических свойств;
 - Вильнюсский государственный университет (проф. Ю. Гурявичене, проф. П. Адаменос), где проводились разработки методов синтеза и очистки поверхностно-активных бифенилов;
 - Белорусский государственный университет (проф. А. М. Шульга), где проводились разработки методов синтеза и очистки поверхностно-активных порфиринов и спиропиранов;
 - ПО «Интеграл», г. Минск (проф. А. И. Дударчик), где проводились работы по промышленному использованию ЛБ-технологии для изготовления ЖК-индикаторов и дисплеев;
 - Институт полупроводников АН Украинской ССР (проф. Б. А. Нестеренко, Ю. М. Шершов, А. В. Набок), где проводилась разработка вариантов конструкции ЛБ-установок, проводились работы по формированию ЛБ-пленок и исследованию их электрических свойств;
 - Институт теоретической физики АН Украинской ССР (акад. А. С. Давыдов, Ю. Б. Гайдидей), где проводились теоретические исследования явления поверхностной активности и функциональных свойств ЛБ-пленок с использованием аппарата квантовой химии и молекулярной динамики;
 - Институт органической химии АН Украинской ССР (проф. Л. М. Ягупольский, проф. А. Я. Ильченко), где проводились разработки методов синтеза и очистки поверхностно-активных диацетиленов и других соединений для функционально-активных ЛБ-пленок;
 - Институт физики АН Украинской ССР (проф. М. Курик), где проводились исследования электрических свойств ЛБ-пленок, выполнялись низкотемпературные измерения, разрабатывалась соответствующая аппаратура.
- Несмотря на общий закрытый характер программы, было выполнено большое количество ныне хорошо известных работ и создана Российская школа по ЛБ-пленкам (см. [1-4, 8]). Регулярно проводится ежемесячный всероссийский научно-технический семинар «ЛЕНГМЮРОВСКИЕ ПЛЕНКИ И АНСАМБЛИ АМФИФИЛЬНЫХ МОЛЕКУЛ» (Институт Кристаллографии РАН, бюро семинара: С. А. Пикин, Л. А. Фейгин, Л. Г. Янусова (ИК РАН), В. А. Быков (НИИФП), С. Ю. Зайцев (ИБОХ РАН), В. В. Арсланов (ИФХ РАН), В. В. Савранский (ИОФ РАН), А. Г. Витухновский (ФИ РАН), при ИНЭОС РАН организован научно-технический центр молекулярных технологий. Был проведен ряд Всероссийских школ, сегодня большое количество работ представляется на конференциях по ЛБ-пленкам.
- Наличие крупной научной программы стимулировало общее развитие работ, что привело к появлению исследований в направлении «ЛБ-пленки биоматериалов». Серьезные исследования в этом направлении по настоящее время ведутся в лаборатории проф. С. Зайцева (Институт биоорганической химии им. Шемякина & Овчинникова РАН), отделе И. Н. Курочкина (Институт молекулярной диагностики и лечения).
- ЛБ-пленки полимерных поверхностно-активных веществ интенсивно изучались лабораторией проф. В. Арсланова в институте физической химии РАН.
- Несмотря на значительное финансирование, включение наиболее известных и мощных научных коллективов, практические результаты оставались весьма скромными и фактически ограничивались использованием монослоев поливинилового спирта в качестве ориентирующих в жидкокристаллических индикаторах. Причем эта ситуация сохранилась и до сегодняшнего дня.
- Для того чтобы понять причину столь интересной ситуации, была необходима новая техника и она в начале 90-х годов прошлого века появилась. Это сканирующие зондовые микроскопы.

СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Сканирующая зондовая микроскопия зародилась в Германии в 1929 году [5]. Густавом Шмальцем был построен микроскоп, чувствительным элемен-

том которого был кантилевер с иглой на свободном конце консоли, а информация в процессе сканирования записывалась на фотопластинке. Микроскоп обеспечивал увеличение в 1000 раз при площади сканирования в четверть квадратного дюйма. В 1966–1972 годах в национальном институте стандартов США в группе Рассела Янга был сделан сверхвысоковакуумный сканирующий туннельный микроскоп (Топографинер), способный получать атомное разрешение [6]. Сканирование образца производилось иглой, а перемещения осуществлялись с использованием 3-координатного пьезоэлектрического сканера. Регистрация результатов производилась выводом данных на 2-х координатный самописец. Авторами была показана возможность регистрации моноатомных ступеней. Но время для развития метода еще не наступило – эра персональных компьютеров, без которых сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) не могла развиваться, пришла позже. В сканирующей электронной микроскопии сканирование в СЗМ осуществляется не пучком практически безынерционных электронов, способных вызывать свечение люминесцентного экрана, каскадное усиление, экспонирование фотопластинки. Это дает возможность реализации простой системы регистрации результатов взаимодействия электронного луча с исследуемым объектом. В отличие от сканирующей электронной микроскопии, зондовая микроскопия является низкоэнергетическим методом относительно медленного сканирования при регистрации результата взаимодействия острия зонда с поверхностью, требующее использования прецизионной электроники. Следствием этих обстоятельств стала жесткая связь развития зондовой микроскопии и компьютеров. Именно появление недорогих персональных компьютеров и привело к развитию сканирующей зондовой микроскопии, как эффективного метода исследования топографии и физических свойств поверхностных структур.

В конце 70-х годов идея создания прибора для визуализации атомных структур возродилась в группе исследователей швейцарского отделения компании IBM Генрихом Рорером и Хельмутом Биннигом, за что они были удостоены Нобелевской премии 1986 года. Г. Бинниг и Г. Рорер показали, что при помощи прибора, названного ими сканирующим туннельным микроскопом, возможно получать отпечатки отдельных атомов в токовом режиме. Для регистрации рельефа поверхности в 1986 году Биннигом, Квайтом и Гербером было предложено использовать гибкие балки с острой иглой на незакрепленном конце – кантилеверы, а приборы для

регистрации рельефа были названы атомно-силовыми микроскопами (АСМ). В АСМ их конструкции использовался туннельный датчик для регистрации нормального перемещения кантилевера, что крайне неудобно. Мощной инновацией, сделавшей АСМ реальностью, стало изобретение Амера и Майера оптико-позиционная схема для регистрации изменения углов наклона кантилевера [7], что при использовании в качестве регистрирующего элемента 4-секционного фотодиода позволяет регистрировать как нормальные, так и латеральные силы взаимодействия зонда и исследуемой поверхности образца. В настоящее время данную схему используют практически все производители атомно-силовых микроскопов. Использование малошумящих полупроводниковых лазеров и 4-секционных фотодиодов позволяет обеспечивать необходимую точность отклонения кантилевера (порядка 0,01 нм), работать в широком частотном диапазоне (до 5 МГц), регистрировать как нормальные отклонения кантилевера, так и изменение угла наклона при фиксации латеральных сил.

Инновация, предотвращающая действие капиллярного эффекта, рожденная в конце 1986 года, была предложена как принципиальная возможность Биннигом, ее реальные возможности показаны группой Ducker W. A., Cook R. F., Clarke D. R. и интегрирована в первые промышленные атомно-силовые микроскопы Верджилом Элингом под названием «теппинг» или «полуконтактная мода».

В 1987 году группой исследователей было предложено изготавливать кантилеверы с использованием арсенала кремниевой технологии, где были уже разработаны приемы селективного травления как «канавок», так и острий с углом при вершине, определяемой свойствами кристалла в процессе селективного травления. Толщину балок можно было задавать либо толщиной покрытия, либо глубиной легирования бором или фосфором. Возможность изготавливать кантилеверы методами «групповых» технологий микроэлектроники сделало их доступным расходным материалом и обеспечило возможность широкого распространения метода.

В конце восьмидесятых – начале девяностых годов XX века была показана возможность регистрации при помощи методов СЗМ ряда физических свойств поверхностей в различных условиях: от сверхвысокого вакуума до исследований на границе раздела «твердое тело – жидкость», методов модификации поверхности, так называемой СЗМ литографии, которые в настоящее время интегрированы в боль-

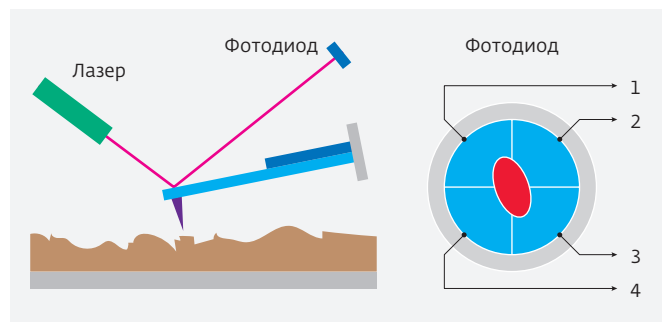


Рис. 1. Оптико-позиционная схема регистрации состояния кантилевера

шинство СЗМ под несколько разными названиями, что не меняет физической сущности методов.

В конце 80-х годов работы по созданию сканирующих зондовых микроскопов стартовали и в СССР. Была организована корпорация МДТ, в которой и были начаты работы по созданию сканирующих зондовых микроскопов с возможностями литографов, на которых можно было бы проводить как исследования, так и модификацию свойств молекулярных структур, в том числе и ЛБ-пленок.

К 1995 году этой же группой были созданы и атомно-силовые микроскопы, а к 1997-м – многоходовые приборы, на которых можно было проводить комплексные исследования поверхностных структур, в том числе и ЛБ-пленок, не разрушая их в процессе исследования.

На рис. 1 показана топография ЛБ-пленок архаидата кадмия. Вместо ожидаемой, согласно сложившимся представлениям молекулярно-гладким структурам, наблюдается ярко-выраженная доменная структура пленок. Оказывается, что предложенная Ленгмюром и Блуджетт модель строения пленок (см. например <https://sites.google.com/site/kolloidnaahimia/pleenki-lengmura-blodzett>) не имеет никакого отношения к реальности. Способ формирования был отождествлен с типом реальной молекулярной структуры. Привлекала исследователей простота построения сложных молекулярных структур и только атомно-силовая микроскопия помогла разобраться и понять, что же реально представляет собой этот славный метод – техника Ленгмюра-Блуджетт. Это всего лишь способ подачи строительного материала – поверхностно-активных молекул, а тип получаемых структур определяется природой этих молекул, а вовсе не способом их нанесения.

К настоящему времени сканирующая зондовая микроскопия вошла в состав классических методов исследования наноструктур и широко исполь-

зуется для качественной оценки физико-химических свойств и геометрических параметров поверхностей.

Кроме топографии, сканирующие зондовые микроскопы позволяют измерять целый ряд физических свойств:

- распределение поверхностного электрического потенциала;
- распределение поверхностной проводимости;
- распределение электрической емкости системы зонд – поверхность $C(x, y)$, а также dC/dz , dC/dV ;
- распределение магнитных сил в системе зонд с заданной намагниченностью – поверхность;
- распределение пьезоэлектрических свойств;
- распределение теплопроводности;
- распределение механических свойств (модуля Юнга, твердости);
- распределение адгезионных свойств.

Измерения можно производить на воздухе, в газовой атмосфере заданного состава, в жидкости, в низком, высоком, сверхвысоком вакууме.

Для реализации возможностей предложены различные конструктивные решения, наиболее мощным из которых является решение, предложенное в ходе выполнения мегапроекта министерства образования и науки группой компаний НТ-МДТ. Это сканирующий зондовый микроскоп «ИНТЕГРА» – прибор, предназначенный для научных исследований для (рис. 2). Отличительной особенностью «ИНТЕГРА» является возможность оперативного изменения конфигурации в зависимости от задач пользователя.

В настоящее время даже приборы, выпущенные в середине 2000-х годов можно дооснастить современными контроллерами и программным обеспечением для работы в полном арсенале известных в настоящее время мод сканирующей зондовой микроскопии.

Сканирующие зондовые микроскопы – приборы, предназначенные фиксировать в том числе весьма малые изменения геометрических параметров объекта, размером, вплоть до единиц нанометра. Но, при этом, необходимо помнить, что игла туннельного датчика, кантилевера, напрямую не «привязана» к данной точке поверхности. Петля механического крепления может составлять от десятка сантиметров до полуметра в случае измерения пластин большого диаметра. При этом изменения температуры образца даже на доли градуса (1-2 градуса обычные колебания температур в лабораторных помещениях) могут привести к смещениям зонда относительно исследуемого объекта на поверхно-

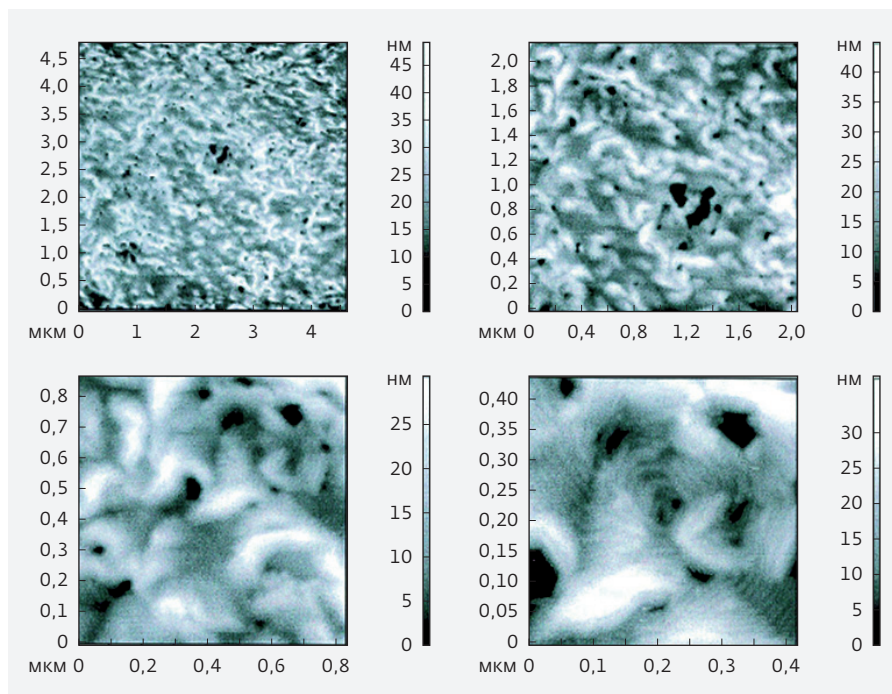


Рис. 2. Топография ЛБ-пленок арахидата кадмия

сти (дрейфу) со скоростью до десятка нанометров в минуту. Дрейф не позволяет получать атомное разрешение при обычных строчных частотах сканирования (1-2 Гц), искажая реальные изображения объекта.

Кроме того, сканирующие зондовые микроскопы весьма чувствительны к механическим вибрациям, звуковым шумам даже при использовании сканеров с резонансными частотами до 20 кГц, что также приводит к появлению дополнительных артефактов и исключает возможность получения качественных результатов в обычных лабораторных условиях даже при использовании специальных виброзащищающих столов с активной системой защиты от вибраций, вынуждая устанавливать приборы на специальных фундаментах или в подвальных, звукозащищенных помещениях.

Для решения этих проблем в настоящее время разработаны специальные портативные боксы (рис. 3), оснащенные системами термостабилизации с контроллерами, обеспечивающими точность поддержания температуры прибора с точностью до $5 \cdot 10^{-3}$ °С. Температура внутри камеры поддерживается на несколько градусов выше температуры лабораторного помещения, что компенсирует выделение тепла собственными электронными компонентами прибора. Использование специальных, звукопоглощающих материалов позволяет обеспечить пода-

вление звуков до 30 дБ в полосе частот 0,3-3 кГц. Такие системы позволяют обеспечить дрейф в пределах 6 нм/ч и дают возможность получить атомное разрешение даже в условиях выставок. Использование «непылящих» материалов позволяет эксплуатировать приборы в гермозонах, практически в любых лабораторных помещениях, обеспечивая возможность получения высококачественных результатов (<http://www.ntmdt-si.ru/page/thermal-cabinet>).

Для центров коллективного пользования приборы типа «ИНТЕГРА», для реализации возможностей которых необходима специальная подготовка, слишком сложны. В этом случае более эффективны автоматизированные приборы - «СОЛВЕР НЕКСТ» и его следующая

конфигурация «ТИТАНИУМ». Приборы оснащены системами автоматического позиционирования, моторизованными подвижками образцов, автоматически сменяемыми измерительными головками. «СОЛВЕР НЕКСТ» вошел в сотню лучших инновационных разработок мира по версии журнала Research & Development 2009 года (<https://www.rdmag.com/award-winners/2009/07/dual-head-spm-puts-two-techniques-one>).

Для быстрой и эффективной работы СЗМ этого типа оснащены легко сменяемыми многозондовыми кантилеверными картриджами, существенно снижающими технические требования к персоналу. Каждый картридж имеет 38 зондов. В зависимости от режима работы, а также при выходе из строя зонда, операция его замены требует нескольких секунд и осуществляется автоматически по требованию оператора.

Потребности микро- и наноэлектроники потребовали создания приборов для измерения объектов диаметром 200, 300 мкм. При этом остаются высокими требования по шумам, дрейфам, возможности реализации многомодовых режимов, быстрого репозиционирования с возможностью возврата на прежнее место с точностью до нескольких нанометров.

СЗМ ВЕГА может эксплуатироваться в чистых помещениях, оснащен мощными системами тер-

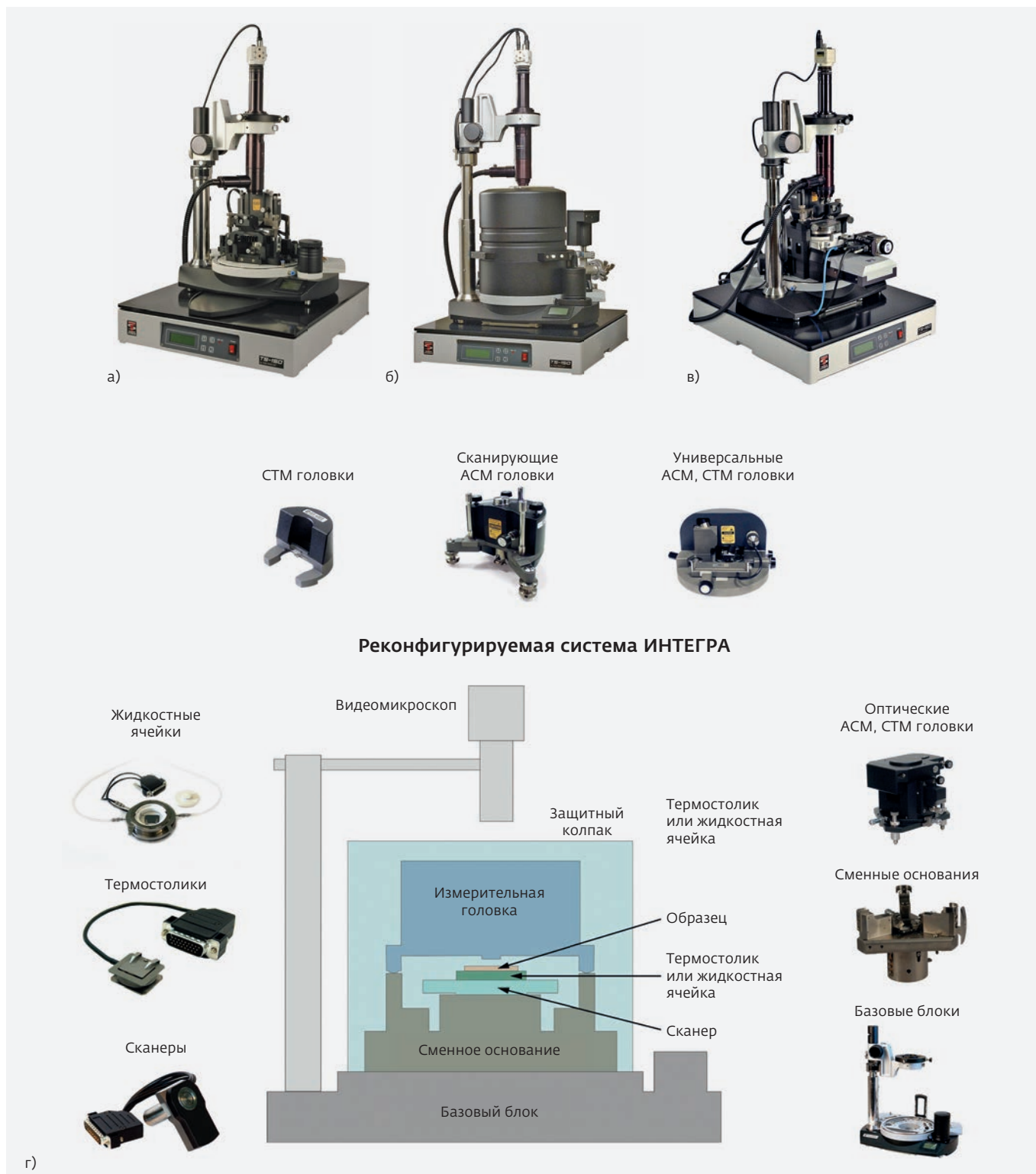


Рис. 3. Варианты реконфигурирования различными измерительными головками и сканерами и фотографии воздушного и вакуумного варианта систем «ИНТЕГРА» холдинга NT-MDT Spectrum Instruments. а – «ИНТЕГРА ПРИМА» – СЗМ для работы на воздухе и в контролируемых средах, б – «ИНТЕГРА АУРА» – возможность работы в вакууме с откачкой до 10^{-4} торр (опционно до 10^{-6} торр), в – «ИНТЕГРА LS» – возможность работы с пластинами диаметром до 100 мм

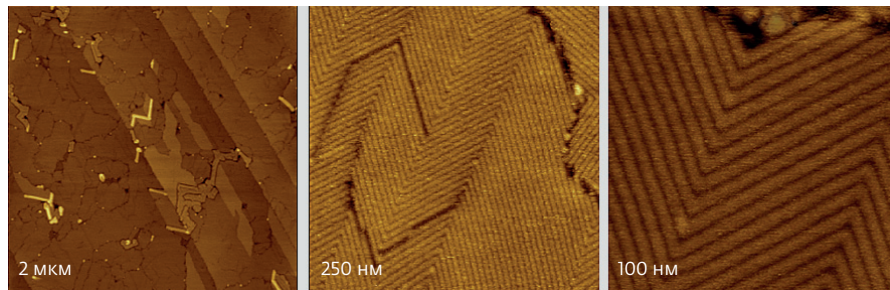
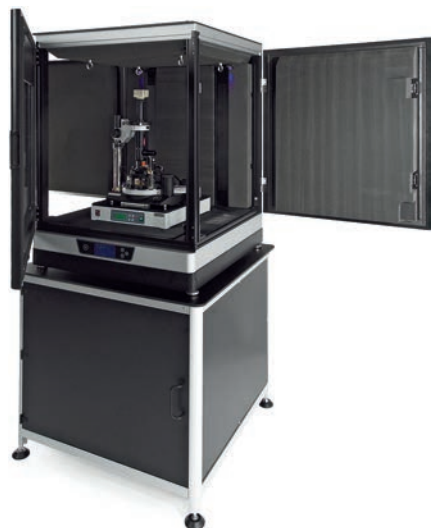


Рис. 4. «ИНТЕГРА ПРИМА» в термо- и акустозащищенном боксе и изображение поверхности флюороалканов на подложке НОРG. Дрейф менее 0,2 нм/мин

мостабилизации, подавления акустических, системой виброзащиты. Даже на пластинах диаметром до 200 мм прибор обеспечивает возможность получения атомарного разрешения. Возможна работа как со стандартными кантилеверами, так и кантилеверными картриджами. Оптический микроскоп прибора обеспечивает разрешения до 1 мкм.

СЗМ В СИСТЕМЕ ШКОЛЬНОГО И ВУЗОВСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Для развития современных технологий исключительно важной задачей является подготовка специалистов. Этот процесс необходимо начинать со школьной скамьи. Видеть и иметь возможность

активно воздействовать на молекулярные структуры. Это резко меняет и усиливает глубину понимания физики, химии, биологии. На рис. 6 приведена фотография и возможности последнего варианта прибора «НАНОЭДЬЮКАТОР», которым в настоящее время оборудованы десятки учебных классов России и мира. Этот прибор вошел в число лучших разработок мира по версии журнала Research & Developments в 2011 году (<http://www.rdmag.com/article/2011/06/2011-r-d-100-award-winners>, http://www.nanometer.ru/2011/07/09/nt_mdt_260146.html).

«НАНОЭДЬЮКАТОР II», в отличие от его первой версии, является современным и достаточно мощным по своим возможностям сканирующим зондовым микроскопом. Сканер прибора оснащен прецизионными емкостными датчиками, обеспечивающими компенсацию крипа и гистерезиса

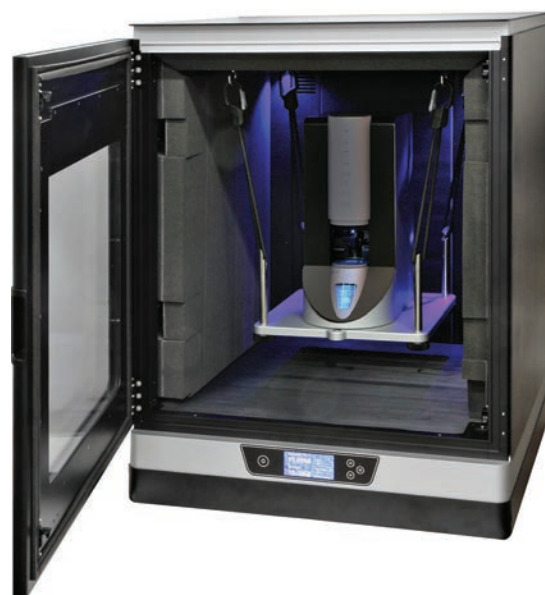
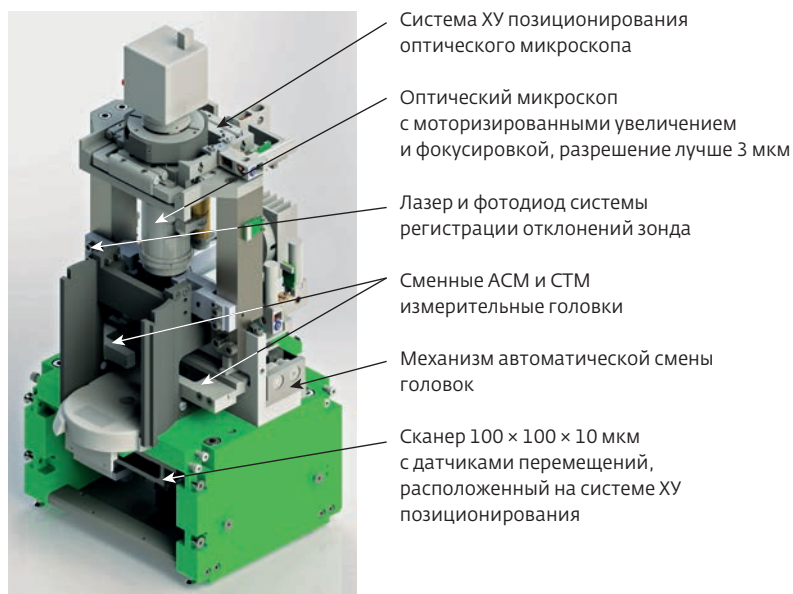


Рис. 5. Сканирующие зондовые микроскопы «СОЛВЕР-НЕКСТ», «ТИТАНИУМ»



Рис. 6. Сканирующий зондовый микроскоп для исследования пластин, диаметром до 200 мм – «ВЕГА» с системой термостабилизации и акустозащиты (а) с установленными на подвижный стол пластинами диаметром 100 мм. Точность поддержания температуры $5 \cdot 10^{-3}$ °С, подавление шумов – 30 ДБ



пьезокерамического трубчатого сканера прибора с возможностью быстрого репозиционирования, возможностью производить режимы литографии без искажения изображения.

«НАНОЭДЬЮКАТОР II» позволяет получать атомное разрешение, изучать биологические объекты, работать практически во всех режимах атомно-силовой и туннельной микроскопии.

НОВЫЕ МОДЫ АСМ

Для минимизации влияния латеральных сил еще в 1993 году была предложена Jumping мода, в которой при сканировании измеряется зависимость силы от расстояния в процессе циклического подвода и отвода зонда от поверхности. При построчном сканировании смещение зонда относительно образца происходит при отведенном от поверхности зонде.

Но вплоть до последнего времени регистрация силовой кривой в каждой точке сканирования занимала слишком много времени и Jumping мода была

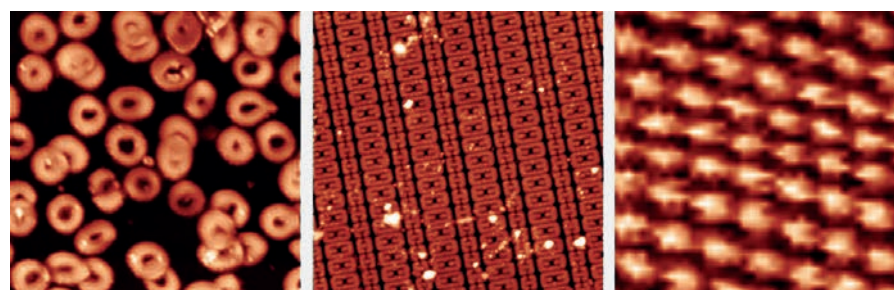


Рис. 7. Прибор для системы образования «НАНОЭДЬЮКАТОР-II» и изображения эритроцитов (размер скана 50×50 мкм), участка микросхемы (размер скана 30×30 мкм) и атомной структуры высоко ориентированного пиролитического графита (СТМ скан размером 2×2 нм), полученные на этом типе приборов

невостребованной. Но в настоящее время соответствующая элементная база появилась – Jumping мода была реализована. Это Peak Force компании Брукер-НАНО (www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/AFM/Webinars/June_2014_Presentation_Slides.pdf), Hybrid Mode™ (HD-AFM™) компании NT-MDT Spectrum Instruments (<http://www.ntmdt-si.ru/hybrid-mode-afm>, [5-7]).

HD-AFM™ компании NT-MDT Spectrum Instruments позволяет одновременно исследовать топографию, жесткость, распределение потенциала, адгезионных сил при строчной частоте сканирования 1-2 Гц, обычной для СЗМ. При этом существенно упрощается алгоритмизация измерений, делая возможность автоматизации настройки необходимых параметров, что, в свою очередь, резко снижает требования к квалификации пользователя. Внедрение новой технологии существенно изменяет потребительские свойства приборов и придает им новое качество – приборов широкого пользования для количественной характеристики свойств наноструктур.

Появление HD-моды и СЗМ-картриджей позволило значительно усилить и расширить возможности автоматизированных приборов, что и привело к созданию «НЕКСТ-II» (<http://www.ntmdt-si.ru/automated-afm/atomic-force-microscope-next>), «ТИТАНИУМ» (<http://www.ntmdt-si.ru/titanium>). Дизайн приборов близок к «СОЛВЕР-НЕКСТ», но внутренние

конструктивные особенности сделали возможным интеграцию картриджей и HD-моды в их конструкцию. Новая разработка – сканирующий зондовый микроскоп «ВЕГА» позволяет работать с пластинами диаметром до 200 мм и при этом получать атомное разрешение, что обеспечивается превосходными резонансными характеристиками прибора в комбинации с мощной системой термостабилизации и акустозащиты [11].

Как уже отмечалось, сканирующие зондовые микроскопы – это «относительно медленные» приборы, время получения изображения в которых составляет минуты. Обычно, частота сканирования составляет 1-2 Гц на строку. Скан может содержать 256, 512, 1024 строки, а, следовательно, необходимо от 2 до 17 мин на получение одного скана. Это накладывает существенные ограничения на возможности изучения динамических явлений. Конечно, существуют возможности изучения состояния объекта в «точке» и в случае малых скоростей дрейфа. Это вполне возможно. Но, тем не менее, повышение скорости сканирования остается важной задачей. Решение этой задачи, в некоторой мере, возможно созданием сканеров и кантилевов с высокой резонансной частотой. В настоящее время сканеры, обеспечивающие сканирование со строчной частотой порядка 500 Гц разработаны, но при этом существует возможность реализации только ограниченного числа мод при ограниче-

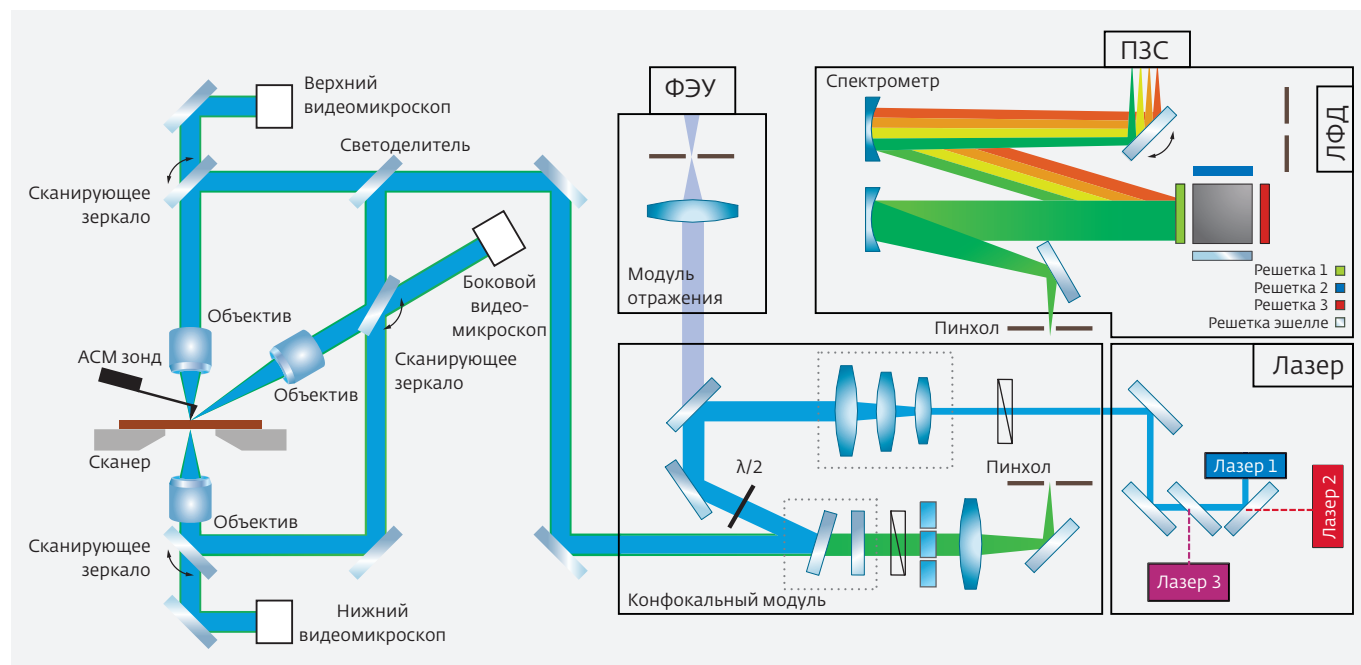


Рис. 8. Схема прибора «ИНТЕГРА-СПЕКТРА-II»

bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/AFM/Brochures/Dimension_FastScan_Atomic_Force_Microscope_brochure.pdf).

СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НАНОМЕТРОВОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Мощное развитие получили комбайны сканирующих зондовых микроскопов и спектрометров, совмещающие методы высоко-разрешающих измерений топографии и различных физических свойств поверхностных структур. Приборы позволяют получать информацию как о физических свойствах поверхностных структур, так и о качественном составе поверхности из данных люминесцентной спектроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния и ИК-спектроскопии высокого пространственного разрешения.

Развитие этих методов началось в 1998 году с разработки сканирующего рамановского спектрометра «НАНОФАЙНДЕР» (компании «НТ-МДТ» и «Токио-Инструментс»), вслед за которым появился прибор «ИНТЕГРА-СПЕКТРА» – комбайн СЗМ и рамановского спектрометра. В 2004 году появилась идея использования эффектов концентрации света на кончике игл из материалов с плазмонными спектрами в видимой области (Tip Enhance Raman Spectroscopy, Ренато Зиноби, Швейцария), что дало принципиальную возможность регистрации рамановского рассеяния от единичных молекул [9].

На рис. 7 показана схема комбинированного прибора «ИНТЕГРА-СПЕКТРА-II» разработки «НТ-МДТ Спектрум Инструментс». Системой зеркал свет от выбранного лазера фокусируется одним из трех

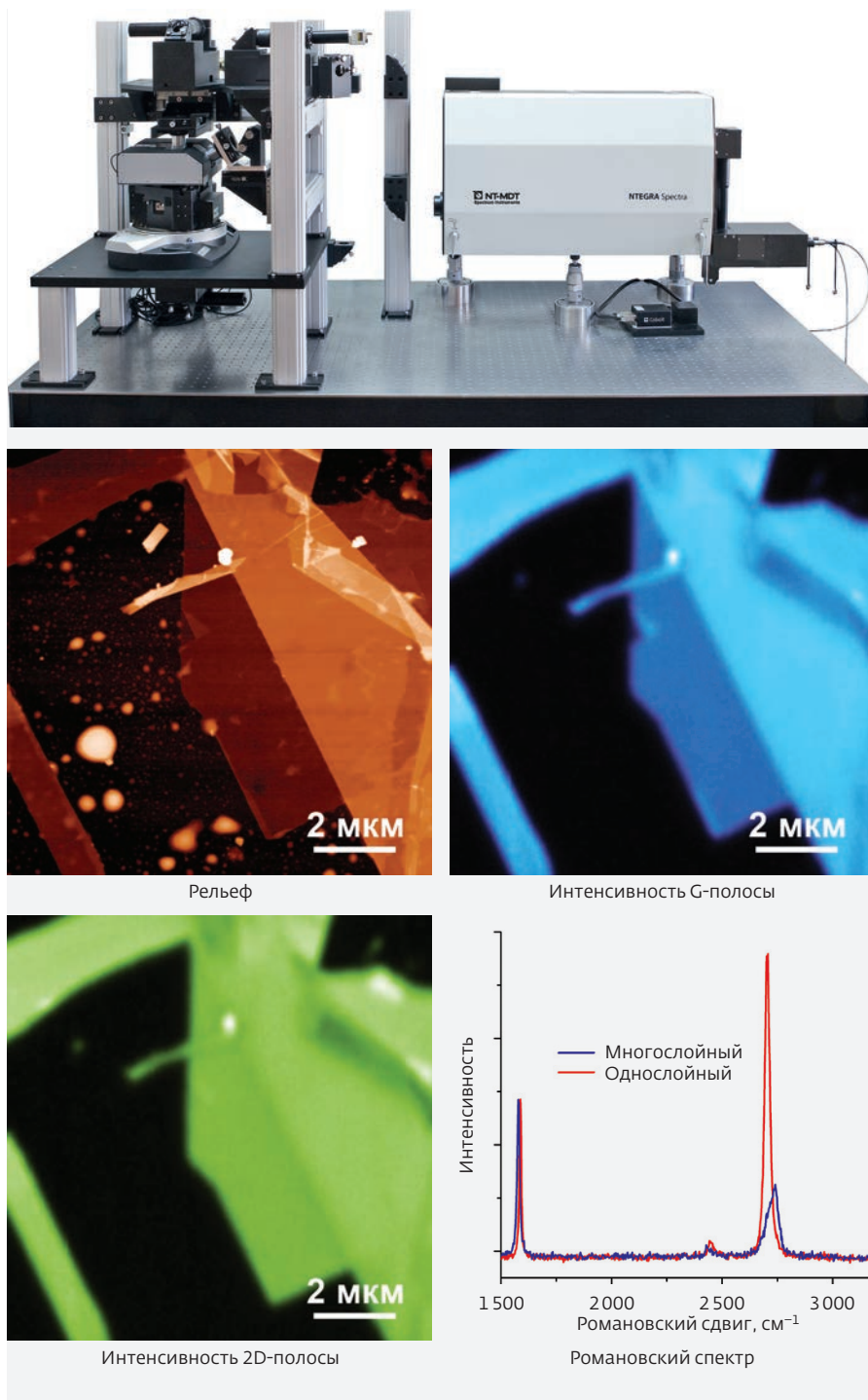


Рис. 9. Комбайн сканирующего зондового микроскопа и спектрометра комбинационного рассеяния света (рамановского рассеяния) и изображения и спектры чешуек графена на Si/SiO₂

ниях и на размер образцов. Качество изображения, сравнимое с обычным для низкочастотных АСМ, можно получить при строчной частоте сканирования порядка 20 Гц (см., например, <https://www.>

объективов в зону зонда СЗМ так, чтобы кантилевер не затенял его. Рассеянный свет собирается тем же объективом, фильтруется соответствующим фильтром от возбуждающего пучка и через щель попадает в спектрометр, где раскладывается в спектр и анализируется. Параллельно возможна регистрация и отраженного сигнала. В системе возможно использование до пяти возбуждающих лазеров.

В настоящее время созданы кантилеверы со специальными покрытиями игл из золото-серебряных сплавов, обеспечивающие усиление сигнала рамановского рассеяния в режиме TERS вплоть до 10^4 , что позволяет получать высокое пространственное разрешение в режиме спектроскопии комбинационного рассеяния от молекулярных объектов. Использование режимов HD-AFM/MTM Mode обеспечивает возможность получения качественных воспроизводимых результатов.

Созданы первые варианты приборов безапертурной ИК ближнепольной микроскопии в комбинации с атомно-силовой микроскопией (Aperturless Scanning Near-Field Optical Microscopy, ASNOM) с латеральным разрешением до 10 нм (рис. 9). В качестве источника ИК-излучения в настоящее время используется CO_2 -лазер с интерферометром Майкельсона с возможностью перестройки по длине волны в диапазоне 10,3–10,8 мкм. Для инициации рассеяния используются зонды с проводящим покрытием. Система позволяет регистрировать неупругое рассеяние, обусловленное взаимодействием излучения при сближении зонда с образцом, модулированное частотой колебания зонда на фоне отраженного сигнала лазера. Использование таких систем позволяет регистрировать изменения диэлектрической проницаемости образцов, а также сигналы неупругого взаимодействия, обусловленные возбуждением колебательных мод молекул на поверхности образца. Дальнейшее развитие приборов, включающих возможности атомно-силовой микроскопии и спектроскопии предполагает объединение методов АСМ, люминесцентной и рамановской спектроскопии и ASNOM с расширением спектрального диапазона последней с использованием каскадных лазеров, что позволит получать комплексную информацию как о топографии и физических свойствах поверхностей, так и о химическом составе поверхностных слоев.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ КАНТИЛЕВЕРОВ АСМ

Параллельно с развитием АСМ интенсивно развивалась и технология изготовления кантилеверов.

Для реализации различных режимов атомно-силовой микроскопии требуются кантилеверы различных типов и конструкции. В настоящее время используются десятки различных типов кантилеверов. В зависимости от режимов измерения нужны кантилеверы с различными резонансными частотами в диапазоне от десятков кГц до 5 МГц (режимы «быстрого» сканирования), различной жесткостью, добротностью, с различными покрытиями, геометрией и радиусом кривизны острий, длиной и формой игл, с функциональными элементами на них (например, терморезистивными датчиками).

Смена зондовых датчиков также требует специальной тренировки и является сдерживающим фактором, усложняющим использование прибора. При малейшей неаккуратности возможна поломка зонда, цена которого может составлять несколько сотен долларов США.

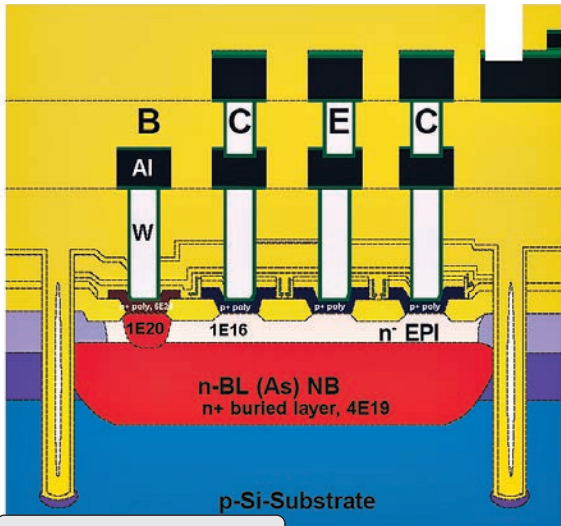
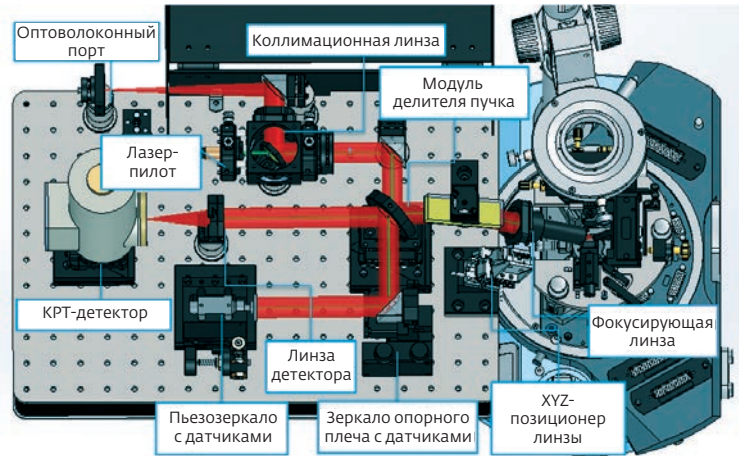
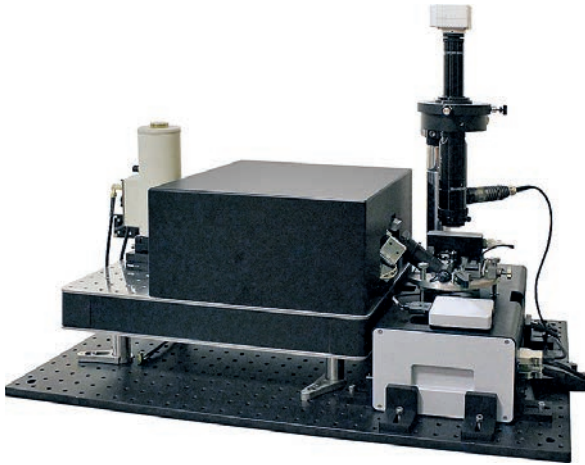
Кроме того, технология изготовления кантилеверов из монокристаллического кремния требует операции глубокого легирования примесями бора или фосфора для стабилизации толщины кантилевера на глубину 1–2 мкм в зависимости от требуемой жесткости балки. При этом при последующем травлении ошибка в задании толщины может составлять до 25% и не постоянна даже на площади одной пластины. Зависимость жесткости (k_z) и резонансной частоты (f_R) прямоугольных кантилеверов описывается известными соотношениями [9]:

$$k_z = \frac{E \cdot t^3 \cdot w}{4 \cdot L^3}, \quad f_R = 0,162 \cdot \frac{t}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

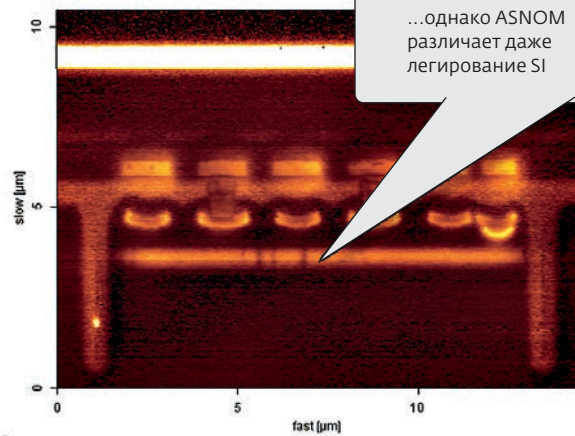
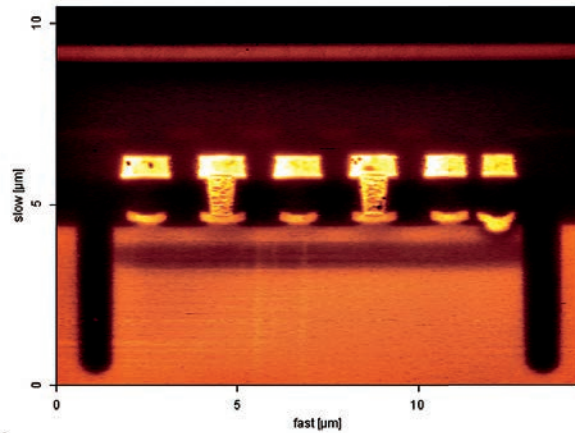
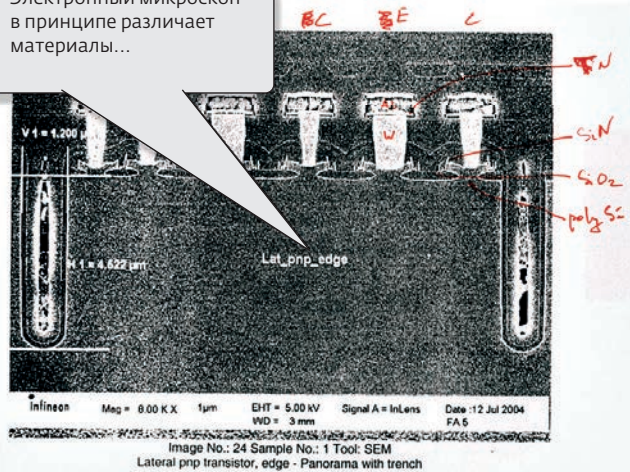
где E – модуль Юнга материала кантилевера, t – толщина, w – ширина, а L – длина балки кантилевера.

Длина и ширина определяется технологиями фотолитографии, точность воспроизведения которых не хуже 1%, а толщина – легированием и травлением, что контролируется существенно хуже, и именно она определяет плохую воспроизводимость свойств кантилеверов, весьма существенную, в особенности, для мод силовой спектроскопии (Hybrid Mode™).

Для решения проблемы воспроизводимости была разработана новая технология производства кантилеверов, в которой толщина балки определяется точностью производства толщины. Для того чтобы избежать сложностей, связанных с неоднородностью травления монокристаллических материалов, в качестве материала балки был выбран поликристаллический кремний, что позволило значительно



Электронный микроскоп в принципе различает материалы...



...однако ASOM различает даже легирование Si

Рис. 10. Безапертурный ближнепольный / атомно-силовой микроскоп, схема и изображение скола пластины с планарного р-п-р-транзистора в электронном микроскопе (слева) и ASOM-изображение, где отчетливо проявляется легированная область, невидимая в электронном микроскопе

увеличить процент выхода годных кантилеверов (практически до 100%) с повторяемостью резонансных характеристик балок лучше 10% и сделало возможным реализацию идеи многозондовых картриджей для АСМ.

Разработка технологии кантилеверов с балками из поликристаллического кремния позволила решить задачу создания зондовых картриджей, радикально упрощающей эксплуатацию приборов. Была предложена центросимметричная конструкция. Картридж представляет собой многозондовый датчик контурного типа диаметром 8 мм, содержащий 38 кантилеверов. Выбор действующего кантилевера осуществляется программно с оптическим контролем. Замена картриджа осуществляется вручную и не является сложной процедурой. Для работы с картриджами созданы специальные измерительные головки, которые интегрируются в новые приборы компании.

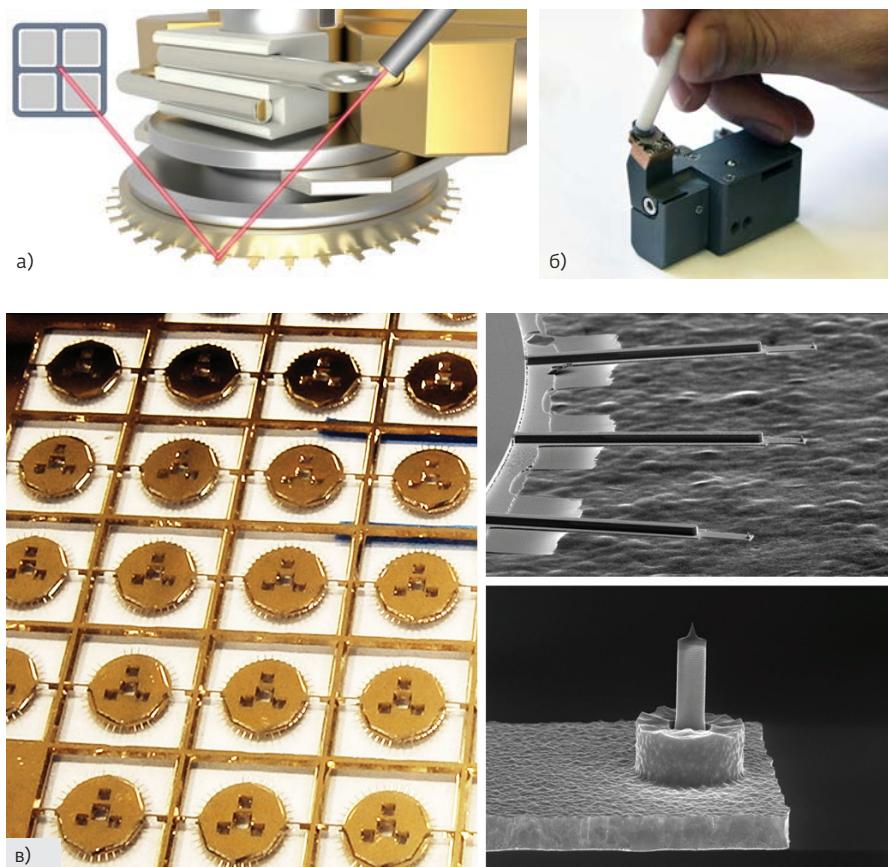


Рис. 11. а – схема СЗМ с картриджами, б – установка картриджа на измерительную головку, в – образцы многозондового картриджа

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЕ КАНТИЛЕВЕРЫ

Развитие технологии пьезоэлектрических материалов сделало возможным создание высокочувствительных тензорезистивных кантилеверов, где для регистрации состояния (угла изгиба, амплитуды и фазы колебания) можно считывать изменение электрического сопротивления структуры, сформированной на самом кантилевере (рис. 11, <http://www.agarscientific.com/afm-spm/self-sensing-cantilever-probes.html>). Появление высокочувствительных тензокантилеверов радикально упрощает конструкцию АСМ, дает возможность создания АСМ, не требующих оптико-позиционных систем.

Считывание состояния тензорезистивного кантилевера

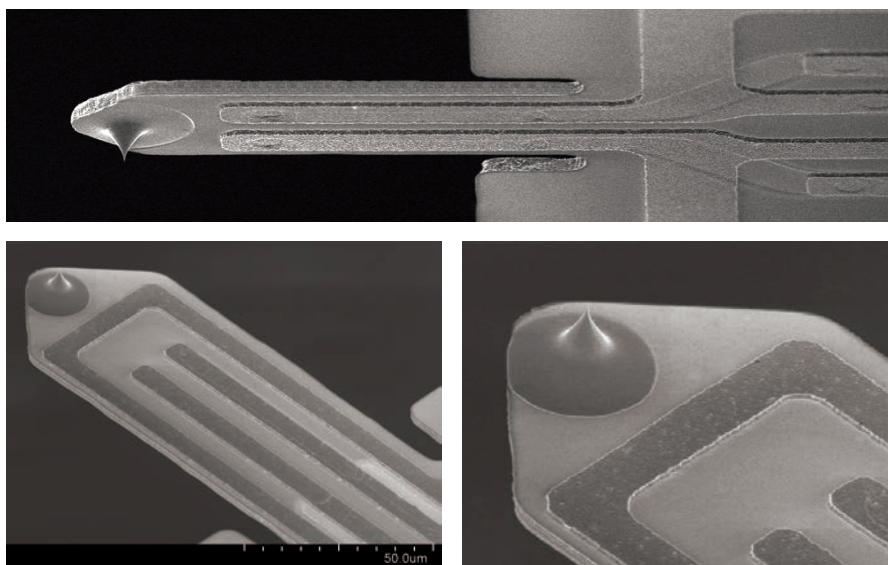


Рис. 12. РЭМ-фотографии тензорезистивных кантилеверов компании AGAR Scientific (UK). Радиус кривизны игл 7–15 нм, материал балки – кремний

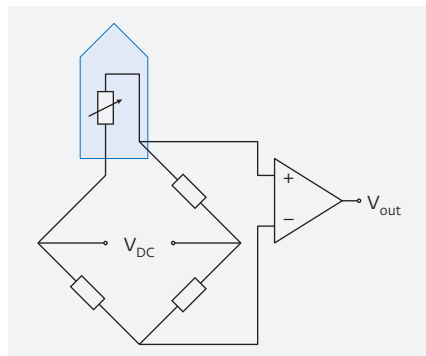


Рис. 13. Принципиальная схема, используемая для регистрации изменения состояния тензокантилевера [8]

(амплитуда колебания, изгиб) осуществляется классической схемой моста Уинстона с использованием дифференциального предусилителя (рис. 12). В настоящее время при работе с тензорезистивными кантилеверами удалось достичь уровня шумов порядка 0,03 нм, что сравнимо с уровнем шумов в оптикопозиционной системе регистрации АСМ-топографии [10].

Появление тензокантилеверов дает возможность реализации атомно-силовых микроскопов для целого ряда приложений, которые ранее считались практически нереализуемыми, например приборов, где параллельно будет работать несколько тензорезистивных датчиков. Появляется возможность и для создания атомно-силовых микроскопов, работающих в условиях, где оптико-позиционная схема практически не реализуема. Использование данных кантилеверов интересно и для реализации мод быстрого сканирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последовательное инновационное развитие сканирующих зондовых микроскопов позволило перепозиционировать эти приборы, существенно снизить требования к пользователям от энтузиастов метода, до специалистов в зондовой микроскопии, а в настоящее время приборами последних разработок группы компаний NT-MDT Spectrum Instruments с успехом могут пользоваться и лаборанты, и инженеры для контроля технологических

параметров процессов, и специалисты-материаловеды, цель которых получить хорошо интерпретируемую информацию о физических и физико-химических особенностях объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Адам Н.К.** Физика и химия поверхностей: ОГИЗ. Государственное издание технико-теоретической литературы. – М.-Л., 1947.
2. **Блинов Л.М.** Ленгмюровские пленки // Успехи физических наук. 1988. Т. 155. Вып. 3. С. 443-480.
3. **Troitsky V.I.** Macromol. Chem., Macromol. Symp. 1991. Vol. 46. P. 223-227.
4. **Myagkov I.V.** Field effect transistor with MTDS junction and gate dielectric on the base of Langmuir films // Letter to the JTP. 1989. Vol. 15. P. 15-18 (USSA).
5. **Schmalz G.** Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, Oct 12, 1929, pp. 146-1467.
6. **Young R., Ward J., Scire F.** The Topografiner: An Instrument for Measuring Surface Microtopology, Rev. Sci. Inst. 1972. Vol. 43. No 7. P. 999.
7. **Meyer G., Amer N.M.** Erratum: novel optical approach to atomic force microscopy // Appl. Phys. Lett. 1988. 53 (24), 2400-2402.
8. **Magonov, S., Belikov, S., Surtchev, M., Leesment S., Malovichko I.** High-Resolution Mapping of Quantitative Elastic Modulus of Polymers. Microscopy and Microanalysis, 2015. 21 (Suppl. 3), pp. 2183-2184. doi:10.1017/S1431927615011691.
9. **Montenegro J., Vazquez-Vazquez C., Kalinin A., Geckeler K.E., Granja J.R.** Coupling of carbon and peptide nanotubes. Journal of the American Chemical Society. 2014. doi:10.1021/ja410901r.
10. **Cho S.T., Najafi K., Wise K.D.** Internal Stress Compensation and Scaling Ultrasensitive Silicon Pressure Sensors // IEEE TED. 1993. Vol. 39. No 4. PP. 836-842.
11. **Alexander J., Magonov S.** (2015). High-Resolution Imaging in Different Atomic Force Microscopy Modes. NT-MDT Application note, Vol. 88. http://www.ntmdt.com/data/media/files/products/general/high-resolution_imaging_in_afm_an088_a4_full.pdf

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ И ТЕРМОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТОВ НА СРЕДНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В АНОДНОМ ОКСИДЕ АЛЮМИНИЯ С НИТЕВИДНЫМИ ПОРАМИ, ЗАПОЛНЕННЫМИ ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДОМ

► Г. Я. Красников¹, В. В. Бардушкин², Д. А. Карташов^{1, 2}, Ю. И. Шилыева², В. Б. Яковлев²

¹АО «НИИМЭ», ²НИУ «МИЭТ»

Решается задача определения и численного моделирования средних напряжений в композитах типа волокна поливинилиденфторида в матрице анодного оксида алюминия, обусловленных различиями термических коэффициентов линейного расширения элементов неоднородности.

EFFECT OF THE STRUCTURE AND THERMOELASTIC CHARACTERISTICS OF COMPONENTS ON THE AVERAGE STRESS IN ANODIC ALUMINUM OXIDE HAVING PORES FILLED WITH POLYVINYLIDENE FLUORIDE

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

¹MERI SC; ²MIET

The problem of determining and numerical modelling the average stress in composites with polyvinylidene fluoride fibres in a matrix of anodic aluminum oxide is solved with allowance for the difference between the thermal coefficients of the linear extension of elements of heterogeneity.

ВВЕДЕНИЕ

Синтез композитов путем заполнения нанопористых матриц металлами или полимерами получил в последние годы широкое распространение. Этот подход позволяет варьировать состав и контролировать геометрические параметры композитных структур при проектировании материалов с заранее заданными свойствами. Благодаря такому подходу становится возможным, например, реализация различных оптических функций, таких как спектральная селекция, поляризация и оптическое переключение [1].

Одним из актуальных вопросов разработки и прогнозирования свойств таких материалов является исследование изменений локальных

(внутренних) напряжений при внешних воздействиях различного вида [2, 3]. Также возникает проблема установления зависимости средних по материалу напряжений от значений локальных напряжений, обусловленных различиями термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) матрицы и заполняющего матрицу материала. Подобная задача для нетекстурированных композитов была решена в [4], для однонаправленно армированных композитов – в [5, 6], для композитов с включениями неизометричной формы – в [7]. В настоящей работе аналогичная задача решается для матричных композитов на основе анодного оксида алюминия (АОА) и поливинилиденфторида (ПВДФ).

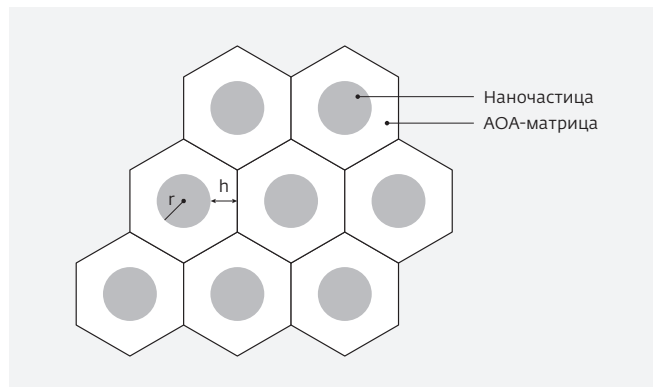
Использование в качестве матрицы пористого АОА для смачивания расплавами и растворами полимеров – простой и универсальный способ наноструктурирования полимеров, в частности, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, к которым относятся ПВДФ и сополимеры на его основе. Наноструктурирование ПВДФ и его сополимеров с трифторэтиленом интересно с точки зрения применения для систем аккумулирования и преобразования энергии, устройств с энергонезависимой памятью [8], сверхчувствительных пьезоэлектрических датчиков в медицине и робототехнике [9], датчиков давления и удара (шок-сенсоров) [10, 11].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

При решении задачи определения средних напряжений в волокнистом матричном композите от значений локальных напряжений элементов неоднородности необходимо учитывать термоупругие характеристики компонентов и концентрацию волокон в материале. Кроме того, требуется представить средние напряжения в удобной для анализа форме, не потеряв при этом информацию о структуре композита [5, 6].

Экспериментальные данные растровой электронной микроскопии показывают, что пористый АОА представляет собой ячеистую структуру, в поперечном сечении которой находятся правильные шестиугольники, примыкающие друг к другу своими сторонами. Поэтому будем считать, что компоненты композита изотропны, положение волокон ПВДФ в объеме матрицы АОА является случайным, однако в целом материал предполагается статистически однородным. Это приводит к наличию среднего расстояния между волокнами, которое можно связать с их концентрацией. Рассмотрим некоторый усредненный элементарный объем в виде правильной шестиугольной призмы, в центре которого находится одно цилиндрическое волокно, ориентированное вдоль оси z лабораторной системы координат. На рис. 1 изображено несколько таких элементарных объемов в сечении, перпендикулярном к оси z .

Пусть отдельное волокно имеет средний радиус r , а расстояние от центра правильного шестиугольника до его стороны равно $r+h$. Тогда площадь основания элементарной ячейки будет $S = 2\sqrt{3}(r+h)^2$, а площадь поперечного сечения волокна $S_0 = \pi r^2$. Считая, что концентрация волокон $V_0 = S_0/S$ (здесь и далее индекс «0» обозначает величины, относящиеся к волокнам, а «м» – к матрице), получим $V_0 = \frac{\pi}{2\sqrt{3}(1+h/r)^2}$.



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

Рис. 1. Схематичное представление структуры материала

$$\frac{h}{r} = \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{3} \cdot V_0}} - 1. \quad (1)$$

Максимально возможное значение концентрации волокон будет в случае, когда $h/r \rightarrow 0$ (при этом $V_0 \rightarrow \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 0,9$), а минимальное значение – при $h/r \rightarrow \infty$ (тогда $V_0 \rightarrow 0$). Данный диапазон соответствует границам применимости методов расчета свойств рассматриваемых неоднородных материалов.

Локальные напряжения, в предположении линейной зависимости флуктуаций от значений средних (внешних) по материалу, можно определить с помощью безразмерного оператора концентрации напряжений [2, 3, 12–14]. Этот оператор является тензором четвертого ранга, связывающим локальные напряжения в каждом элементе неоднородности со значениями средних по материалу напряжений (здесь и в дальнейшем по тексту \vec{r} – радиус-вектор случайной точки среды):

$$\sigma_{ij}(\vec{r}) = K_{ijkl}^0(\vec{r}) \langle \sigma_{kl}(\vec{r}) \rangle. \quad (2)$$

Угловые скобки в выражении (2) обозначают усреднение по объему материала [15]. Отметим, что для матричного композита с изотропными компонентами операция усреднения сводится (для некоторой случайной величины $a(\vec{r})$) к суммированию:

$$\langle a(\vec{r}) \rangle = V_0 a_0 + V_m a_m, \quad (3)$$

где $V_0 + V_m = 1$.

Для реальных неоднородных сред оператор $K_{ijkl}^\sigma(\vec{r})$ описывает связь между приложенным внешним $\langle \sigma_{kl}(\vec{r}) \rangle$ и внутренним $\sigma_{ij}(\vec{r})$ напряжениями. Очевидно, что $K_{ijkl}^\sigma(\vec{r})$ является невырожденным. Значит, можно с помощью тензора, обратного $K_{ijkl}^\sigma(\vec{r})$, произвести расчет внешнего напряженного состояния волокнистого композитного материала при изменении локальных напряжений.

Для приближений, учитывающих взаимодействие включений, оператор концентрации напряжений можно получить, решая систему стохастических дифференциальных уравнений второго порядка (уравнений равновесия). Используя метод функций Грина, с помощью обобщенного сингулярного приближения теории случайных полей и специально вводимого однородного тела сравнения [15], получается выражение для оператора концентрации напряжений (индексы опущены) [2, 3]:

$$K^\sigma(\vec{r}) = c(\vec{r})(I - gc''(\vec{r}))^{-1} \langle c(\vec{r})(I - gc''(\vec{r}))^{-1} \rangle^{-1}, \quad (4)$$

где I – единичный тензор четвертого ранга; двойным штрихом обозначена разность между величинами неоднородной среды и однородного тела сравнения; g – интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия, являющийся тензором четвертого ранга. Физический смысл такого приближения заключается в предположении однородности полей напряжений и деформаций в пределах неоднородности. Соотношение (4) учитывает взаимодействие включений и матрицы.

Для произвольной симметрии компоненты g_{ijkl} тензора g могут быть вычислены в явной форме [15]:

$$g_{ijkl} = a_{i(jk)l}, \text{ где } a_{iklj} = -\frac{1}{4\pi} \int n_k n_j t_{il}^{-1} d\Omega, \quad d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi, \quad t_{il}^{-1} \text{ – эле-}$$

менты матрицы, обратной матрице T с элементами $t_{il} = c_{iklj}^c n_k n_j$, а n_k и n_j ($k, j = 1, 2, 3$) – компоненты вектора внешней нормали к поверхности включения. Для эллипсоидальных включений с главными полуосями l_1, l_2 и l_3 компоненты вектора нормали определяются соотношениями: $n_1 = \frac{1}{l_1} \sin\theta \cos\varphi, n_2 = \frac{1}{l_2} \sin\theta \sin\varphi,$

$n_3 = \frac{1}{l_3} \cos\theta$. По парам индексов i и j, k и l , заключенным в выражении для компонент g_{ijkl} тензора g в круглые скобки, осуществляется операция симметризации. Верхний индекс «с» в записи компонент c_{iklj}^c тензора модулей упругости указывает на то, что рас-

сматриваются упругие характеристики однородного тела сравнения.

В работе рассматривается случай волокон, для главных полуосей которых выполняются следующие соотношения: $l_1 = l_2 = r, l_3 \rightarrow \infty$. Поэтому компоненты вектора нормали вычисляются по форму-

лам: $n_1 = \frac{1}{r} \sin\theta \cos\varphi, n_2 = \frac{1}{r} \sin\theta \sin\varphi, n_3 \rightarrow 0$. Кроме того,

в качестве параметров тела сравнения используются упругие модули матрицы [16]. Тогда в выражении (4) $c''(\vec{r}) = c(\vec{r}) - c_m$, причем $c''(\vec{r}) = c_\sigma - c_m$ во включении, $c''(\vec{r}) = 0$ в матрице. Отсюда, с учетом (3), соотношение (4) для операторов концентрации напряжений в волокне и в матрице примут вид:

$$K_\sigma^\sigma = c_\sigma (I - g(c_\sigma - c_m))^{-1} (V_\sigma c_\sigma (I - g(c_\sigma - c_m))^{-1} + V_m c_m)^{-1},$$

$$K_m^\sigma = c_m (V_\sigma c_\sigma (I - g(c_\sigma - c_m))^{-1} + V_m c_m)^{-1}.$$

В качестве условия, приводящего к изменению напряженного состояния однонаправленно армированного композита, в работе рассматривается фактор температурного расширения волокон и матрицы. В этом случае локальные значения напряжений имеют вид:

$$\sigma_{ij}(\vec{r}) = c_{ijkl}(\vec{r}) \alpha_{kl}(\vec{r}) \Delta T.$$

Здесь $\alpha_{kl}(\vec{r})$ – компоненты тензора температурного расширения, ΔT – изменение температуры. Для волокнистого композитного материала с изотропными компонентами

$$\alpha_{kl}(\vec{r}) = \alpha(\vec{r}) \delta_{kl},$$

где $\alpha(\vec{r})$ – температурный коэффициент расширения, причем $\alpha(\vec{r}) = \alpha_m$ для матрицы; $\alpha(\vec{r}) = \alpha_\sigma$ для включения; δ_{kl} – символ Кронекера.

Тогда для отдельного включения вклад его локального напряженного состояния в среднее напряженное состояние композита составит

$$\langle \sigma_\sigma \rangle = (K_\sigma^\sigma)^{-1} \sigma_\sigma = (K_\sigma^\sigma)^{-1} c_\sigma \alpha_\sigma \Delta T \delta_{kl}.$$

Для отдельного бесконечно малого объема матрицы вклад его локального напряженного состояния в среднее напряженное состояние волокнистого композита составит

$$\langle \sigma_m \rangle = (K_m^\sigma)^{-1} \sigma_m = (K_m^\sigma)^{-1} c_m \alpha_m \Delta T \delta_{kl}.$$

Отсюда, учитывая (3), среднее напряжение, вызванное термическим расширением однонаправленно армированного композита с изотропными компонентами, будет определяться следующим соотношением

$$\langle \sigma \rangle = V_b \langle \sigma_b \rangle + V_m \langle \sigma_m \rangle,$$

или

$$\langle \sigma \rangle = \left(V_b (K_b^\sigma)^{-1} c_b \alpha_b + V_m (K_m^\sigma)^{-1} c_m \alpha_m \right) \Delta T \delta_{kl}. \quad (5)$$

ПРОВЕДЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

Далее в работе по соотношению (5) для однонаправленных матричных композитов с изотропными компонентами были проведены модельные вычисления по определению средних напряжений в направлениях параллельном и перпендикулярном волокнам ПВДФ (модуль Юнга 1,5 ГПа, коэффициент Пуассона 0,29, ТКЛР $\alpha_b = 12 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $T_{пл} \approx 175 \text{ }^\circ\text{C}$) в матрице пористого АОА (модуль Юнга 140 ГПа, коэффициент Пуассона 0,32, ТКЛР (при $T \approx T_{пл}$ для ПВДФ) $\alpha_{||} = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ – в направлении, параллельном волокнам, $\alpha_{\perp} = 5,85 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ – в направлении, перпендикулярном волокнам) [17–20]. Отметим, что для получения расчетного значения ТКЛР α_m изотропной АОА-матрицы величины $\alpha_{||}$ и α_{\perp} усреднялись по формуле $\alpha_m = \frac{2\alpha_{\perp} + \alpha_{||}}{3}$.

В расчетах при операциях над тензорами использовалась их матричная форма записи. При этом ненулевые элементы c_{ij} ($i, j = 1, \dots, 6$) симметрической матрицы тензора модулей упругости c для изотропного материала выражаются через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν следующим образом [15]:

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

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

На рис. 2 приведены расчетные зависимости значений средних напряжений для модельных композитов от среднего расстояния между нитевидными волокнами (безразмерный параметр h/r (1), характеризующий структуру материала), выполненные по соотношению (5). Расчеты проводились при $T \approx T_{пл} \text{ }^\circ\text{C}$ для ПВДФ, $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, в направлениях, перпендикулярном (рис. 2а) и параллельном (рис. 2б) волокнам. Отметим, что, в силу структуры рассма-

триваемых композитов, значения компонент $\langle \sigma_{11} \rangle$ и $\langle \sigma_{22} \rangle$ равны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно заключить следующее.

1. Кривые зависимости значений компонент $\langle \sigma \rangle$, вызванных нагревом, имеют ярко выраженные экстремумы при $h/r \approx 0,5$ (т.е. при $V_b \approx 0,4$). Вид указанных кривых существенно отличается от поведения аналогичных кривых, описывающих зависимости компонент $\langle \sigma \rangle$ для материалов на основе АОА-матриц с металлическими волокнами [6, 21]. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании изделий из рассматриваемых материалов, так как очень высокие значения средних напряжений могут приводить к растрескиванию матрицы и выходу этих изделий из строя.

2. Значения компоненты $\langle \sigma_{33} \rangle$ тензора $\langle \sigma \rangle$ при любом h/r больше соответствующих значений компонент $\langle \sigma_{11} \rangle$ и $\langle \sigma_{22} \rangle$.

3. При $h/r > 5$ средние напряжения, обусловленные различиями ТКЛР волокон ПВДФ и АОА-матрицы, стабилизируются. Кроме того, при $h/r > 15$ значения $\langle \sigma_{33} \rangle$ становятся равными значениям компонент $\langle \sigma_{11} \rangle$ и $\langle \sigma_{22} \rangle$, что обусловлено очень малой концентрацией ПВДФ в композите.

Таким образом, полученные данные по средним напряжениям в рассматриваемых структурах позволяют установить количественные зависимости тер-

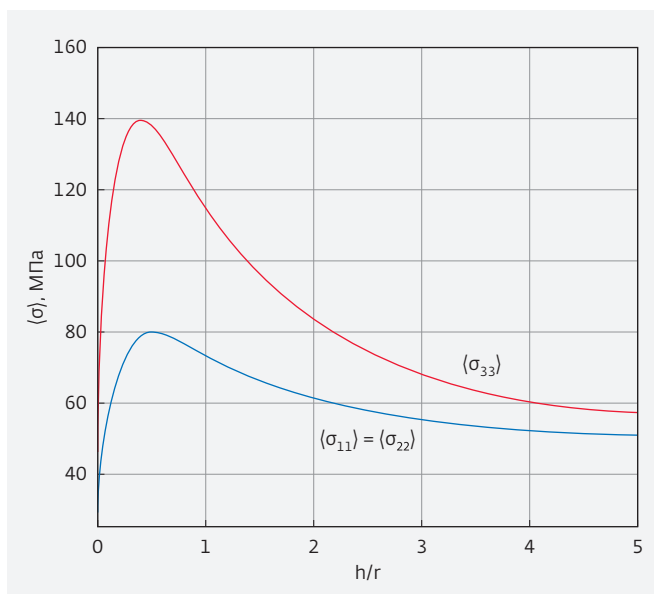


Рис. 2. Зависимости значений ненулевых компонент $\langle \sigma \rangle$ от структурного параметра h/r

модинамических свойств ПВДФ, синтезированных в АОА-матрицах, от их размеров. Эти данные могут быть использованы при моделировании процессов плавления волокон ПВДФ с учетом различия ТКЛР включений и матрицы. Дальнейшие исследования термоупругих характеристик и температурных диапазонов стабильности рассматриваемых композитов с учетом предложенной модели позволят оптимизировать процессы получения и применения нанокompозитных материалов на основе пористого АОА.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сокол В.А., Яковцева В.А., Шиманович Д.Л.** Особенности применения пористых оксидов алюминия // Доклады БГУИР. 2012. № 2(64). С. 21–27.
2. **Колесников В.И., Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Сычев А.П., Колесников И.В.** Микромеханика поликристаллов и композитов (напряженно-деформированное состояние и разрушение). – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУПС, 2012. 288 с.
3. **Колесников В.И., Яковлев В.Б., Бардушкин В.В., Сычев А.П.** О прогнозировании распределений локальных упругих полей в неоднородных средах на основе обобщенного сингулярного приближения // Наука Юга России. 2015. Т. 11. № 3. С. 11–17.
4. **Колесников В.И., Бардушкин В.В., Сычев А.П., Яковлев В.Б.** Напряженное состояние композитных материалов в условиях воздействия термодинамических факторов // Наука Юга России. 2005. Т. 1. № 4. С. 9–13.
5. **Колесников В.И., Бардушкин В.В., Сычев А.П., Яковлев В.Б.** Влияние микроструктуры и термоупругих характеристик компонентов на средние напряжения в волокнистых композитных материалах // Материалы, технологии, инструменты. 2009. Т. 14. № 2. С. 12–15.
6. **Шиляева Ю.И., Бардушкин В.В., Силибин М.В., Гаврилов С.А., Яковлев В.Б., Пятилова О.В.** Влияние структуры и термоупругих свойств компонентов на средние напряжения в анодном оксиде алюминия с порами, заполненными металлическими нитевидными нанокристаллами // Неорганические материалы. 2013. Т. 49. № 7. С. 723–728. DOI: 10.7868/S0002337X13060134.
7. **Колесников В.И., Бардушкин В.В., Сорочкин А.И., Сычев А.П., Яковлев В.Б.** Влияние термоупругих характеристик компонентов, формы и ориентации неизометричных включений на средние напряжения в матричных структурах // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 5. С. 43–47.
8. **Lu M.S., Lu C., Li M.H., Liu C.L., Chen W.C.** Nonvolatile organic transistor memory devices based on nanostructured polymeric materials // In SPIE Organic Photonics + Electronics. International Society for Optics and Photonics. 2014. P. 91850N-91850N.
9. **Persano L., Dagdeviren C., Su Y., Zhang Y., Girardo S., Pisignano D., Huang Y., Rogers J.A.** High performance piezoelectric devices based on aligned arrays of nanofibers of poly(vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene) // Nature communications. 2013. No. 4. P. 1633.
10. **Liu Y., Weiss D.N., Li J.** Rapid nanoimprinting and excellent piezoresponse of polymeric ferroelectric nanostructures // ACS nano. 2009. Vol. 4. No. 1. P. 83–90.
11. **Ren G., Cai F., Li B., Zheng J., Xu C.** Flexible Pressure Sensor Based on a Poly (VDF-TrFE) Nanofiber Web // Macromolecular Materials and Engineering. 2013. Vol. 298. No. 5. P. 541–546.
12. **Бардушкин В.В., Шиляева Ю.И., Яковлев В.Б.** Концентрация напряжений и деформаций в пористозаполненном металлическими нитевидными нанокристаллами анодном оксиде алюминия // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 10. С. 24–29.
13. **Бардушкин В.В., Кириллов Д.А., Шиляева Ю.И.** Моделирование локальных упругих характеристик нанокompозитов на основе анодного Al_2O_3 с нитевидными порами, заполненными Cu, Ag и Au // Информатика и кибернетика. 2016. № 1(3). С. 38–43.
14. **Красников Г.Я., Бардушкин В.В., Силибин М.В., Шиляева Ю.И., Яковлев В.Б.** Концентрация напряжений и деформаций в анодном оксиде алюминия с нитевидными порами, заполненными поливинилиденфторидом // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2016. № 2(162). С. 65–70.
15. **Шермергор Т.Д.** Теория упругости микронеоднородных сред. – М.: Наука, 1977. 399 с.
16. **Хорошун Л.П., Маслов Б.П., Лещенко П.В.** Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов. – Киев: Наукова думка, 1989. 207 с.

17. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
18. **Xia Z., Riester L., Sheldon B. W., Curtin A., Liang J., Yin A., Xu J. M.** Mechanic properties of highly ordered nanoporous anodic alumina membranes // *Reviews of Advanced Materials Science*. 2004. Vol. 34. No. 6. P. 131–139.
19. **Gu P., Miao H., Liu Z. T., Wu X. P., Zhao J. H.** Investigation of elastic modulus of nanoporous alumina membrane // *Journal of Materials Science*. 2004. Vol. 39. Issue 10. P. 3369–3373.
20. Справочник по пластическим массам (в 2-х томах) / Под ред. В. М. Катаева, В. А. Попова, Б. И. Сажина. – М.: Химия, 1975. Т. 1. 448 с.
21. **Бардушкин В.В., Кириллов Д.А., Шиляева Ю.И., Гаврилов С.А., Яковлев В.Б., Силибин М.В.** Влияние термоупругих свойств компонентов на температуру плавления нитевидных наночастиц Cu, Ag и Au в матрице анодного Al_2O_3 // *Журнал физической химии*. 2017. Т. 91. № 6. С. 1030–1036. DOI: 10.7868/S0044453717060048.

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ Si-SiO₂ С НАНОТОНКИМИ СЛОЯМИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

► Н. А. Зайцев, Г. Я. Красников, Ю. И. Плотников
АО «НИИМЭ»

Проведено исследование некоторых оптических и электрофизических характеристик (показатель преломления, критическое поле пробоя, вольт-фарадные характеристики) структур Si-SiO₂ с нанотонкими слоями диоксида кремния. Показано, что в диапазоне 3–11 нм эти параметры существенно зависят от толщины SiO₂. С уменьшением толщины диоксида наблюдается увеличение показателя преломления примерно на 5% и критического поля пробоя примерно на 25%, а также сдвиг ВФХ в сторону положительных напряжений вплоть до перехода напряжения плоских зон через нуль. Наиболее резкое изменение n и $E_{кр}$ а также переход через нуль $E_{рб}$ имеют место в области толщин 6,0–7,5 нм. Объяснение наблюдаемых явлений предложено в рамках адсорбционной модели.

PHYSICO-TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE SYSTEM FORMATION Si-SiO₂ WITH NANOTHIN LAYERS OF SILICON DIOXIDE

N.A. Zaytsev, G.Ya. Krasnikov, Yu.I. Plotnikov

MERISCI

The study tested some optical and electrophysical characteristics (index of refraction, the critical field of breakdown, characteristic volt-faradnye) structures of Si-SiO₂ with nanothin layers of dioxide of silicon. The study shows that in the range the 3–11th these parameters significantly depend on SiO₂ thickness. With reduction of thickness of dioxide increase in index of refraction ~ for 5% and the critical field of breakdown ~ for 25%, and also shift of VFH towards positive tension is observed up to transition of tension of flat zones through zero. The sharpest change of n and $E_{кр}$ and also transition through zero $E_{рб}$ take place in the field of thickness of 6,0–7,5 nanometers. The explanation of the observed phenomena is offered within the adsorptive model.

Бурное развитие работ в области технологии нанoeлектроники потребовало проведения исследований размерных эффектов в уже, казалось бы, хорошо известных структурах микроэлектроники [1, 2].

«Классической» структурой, на которой базируются современные микро- и нанoeлектроника, является структура Si-SiO₂. В связи с этим перед работой была поставлена задача исследования зави-

симости свойств такой структуры от толщины слоя диэлектрика.

Рост тонких слоев диоксида кремния (толщиной до 10 нм) протекает в особых физико-химических условиях, в первую очередь определяющих кинетику формирования и структуру переходного слоя [3].

Термическое окисление кремния представляет собой выраженный неравновесный процесс [3–5], в ходе которого выделяется большое количество

теплоты ($8,8 \cdot 10^5$ Дж/моль), которое не успевает отводиться за счет теплопроводности. Поэтому значительная ее часть идет на образование дефектов как в SiO_2 , так и в Si. В первую очередь возникают точечные дефекты вакансии и междоузлия – энергия их образования в 2–3 раза ниже энергии, выделяющейся в процессе единичного акта окисления. Так как реакция между кремнием и кислородом идет в условиях дефицита последнего, то в SiO_2 наиболее распространены кислородные вакансии и междоузельные атомы кремния.

Неравновесность процесса окисления приводит к образованию метастабильных структур, которые после окончания процесса окисления оказываются как бы «заморожены» в объеме, в первую очередь, вблизи границ раздела сред, и прежде всего – на границе Si– SiO_2 . Именно область границы является основной причиной квазиравновесности состояния систем. Известно, что переходная область между кремнием и диоксидом кремния состоит из нестехиометрического слоя SiO_x , за которым следует слой SiO_2 , со структурой, отличной от объемной, и толщина этой области составляет величину до 2 нм.

Кроме того, в результате образования системы Si– SiO_2 в кремниевой подложке действуют растягивающие напряжения, поэтому здесь энергетически предпочтительно появление междоузлий. Взаимодействие точечных дефектов друг с другом и с другими примесями приводит к возникновению преципитатов и дефектов упаковки. Взаимодействие металлических примесей с дефектами упаковки обуславливает электрическую активность последних. Накопление точечных дефектов ведет к деструкции приповерхностного слоя вплоть до его аморфизации [4].

Процесс установления равновесия системы должен сопровождаться уменьшением ее внутренней энергии и упорядочением структуры диэлектрического слоя. Под упорядочением мы понимаем уменьшение неоднородности структуры диэлектрика по его объему и на границах раздела газ – SiO_2 и Si– SiO_2 .

Стабилизация и переход к действительно равновесному состоянию с минимальной энергией осуществляется путем релаксации метастабильных областей. Для проведения такой релаксации необходимо преодолеть определенный энергетический барьер и, в принципе, затратить бесконечно большое время [4]. В то же время термодинамическое равновесие в структурно неоднородной системе Si– SiO_2 достижимо лишь при условии, что электрохимические потенциалы одного и того же структур-

ного элемента одинаковы во всех его частях. Протекание процесса релаксации в системе Si– SiO_2 возможно в условиях вязкого течения SiO_2 и удаления из его объема посторонних примесей.

Из сказанного следует естественный вывод о том, что устройства и технологии термической обработки пластин кремния должны обеспечивать выполнение следующих условий:

- очистку поверхностного слоя кремниевых пластин перед окислением. При этом качество очищенной поверхности должно быть как можно ближе к качеству свободной поверхности кремния;
- окисление в строго контролируемой и, возможно, однокомпонентной среде;
- исключение контакта с внешней неконтролируемой средой между операциями очистки и окисления.

Если с выполнением двух последних требований вопросов не возникает, то для очистки поверхности перед окислением необходимо наличие комплекса сложного технологического оборудования и сверхчистых химикатов. Это делает процесс достаточно критичным в технологии ИС.

К тому же химические отмычки не решают вопрос с гидратным покрытием поверхности [6]. Адсорбированные на поверхности гидроксильные группы могут проявить себя при дальнейшем уменьшении проектных норм.

Исходя из вышеизложенного, поставленная в работе задача была уточнена следующим образом: исследовать некоторые свойства тонких слоев оксида кремния, полученных после специальной глубокой очистки поверхности кремния [9] с соблюдением выдвинутых требований к технологии.

Работа проведена на Si-пластинах с удельным сопротивлением $\rho = 1$ и $4,5$ Ом/см и ориентацией (111) и (100).

Перед процессом окисления пластины проходили стандартную химобработку, после которой на поверхности оставался исходный слой диэлектрика, который можно считать нестехиометрическим диоксидом кремния с нарушенной структурой. Толщина этого слоя составляла 1–1,5 нм и увеличивалась с увеличением времени контакта с атмосферой до ~2 нм.

После химобработки пластины в среде азота помещались в реакционную камеру, азот откачивался до давления $\sim 10^{-5}$ мм. рт. ст. и проводился их отжиг в течение 30 мин при 700 °С, что, согласно [6], должно было устранить большинство адсорбированных частиц, в том числе молекулярную воду

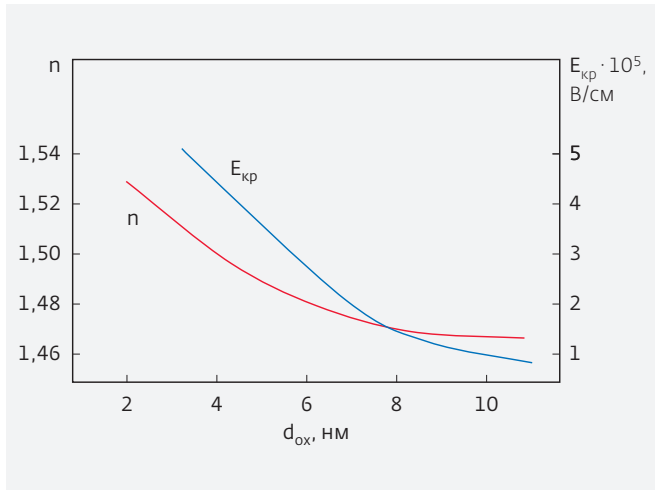


Рис. 1. Зависимость показателя преломления (n) и критического поля пробоя $E_{кр}$ от толщины окисной пленки диоксида кремния

и физически адсорбированные ОН-группы. Затем в систему подавался кислород, для дополнительной очистки пропущенный через азотную ловушку.

Окисление проводилось так же при $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, время окисления составляло от 3 до 40 мин.

Таким образом, были получены слои «диоксида кремния» толщиной от 3,4 до 11 нм с воспроизводимостью 0,3 нм. Измерения толщины и коэффициента преломления проводились методом эллипсометрии [7]. Оценка погрешности изме-

рения толщины пленки не превышала $\Delta d \approx 0,2\text{ нм}$ и показателя преломления $\Delta n \approx 0,005$.

Сразу отметим, что зависимости свойств пленки от удельного сопротивления кремния замечено не было. Скорость роста SiO_2 для ориентации (111) составила $5,4 \cdot 10^{-1}\text{ нм/с}$ и для ориентации (100) – $3,4 \cdot 10^{-1}\text{ нм/с}$.

На рис. 1 показано изменение показателя преломления и критического поля пробоя выращенного диэлектрика. Оба параметра растут с уменьшением толщины, причем довольно значительно (на 5 и 25% соответственно). Отметим, что наиболее резкие изменения начинаются в области толщин $\sim 6,0\text{--}7,5\text{ нм}$.

На рис. 2 представлены зависимости вольт-фарядных характеристик МДП-структур и рассчитанных по ним величин напряжения плоских зон от толщины SiO_2 . Видно, что напряжение плоских зон меняет знак и в диапазоне толщин $\sim 6,0\text{--}7,5\text{ нм}$.

Отметим, что результаты, полученные на пластинах с разной ориентацией, практически совпадают для слоев SiO_2 одинаковой толщины.

На основании полученных результатов можно сделать некоторые предположения о том, как формируются структурные и электрофизические свойства тонких слоев диэлектрика в системе Si-SiO₂.

Как известно [5], процесс создания и свойства термической пленки, в основном, определяются соотношением концентраций реагирующих компо-

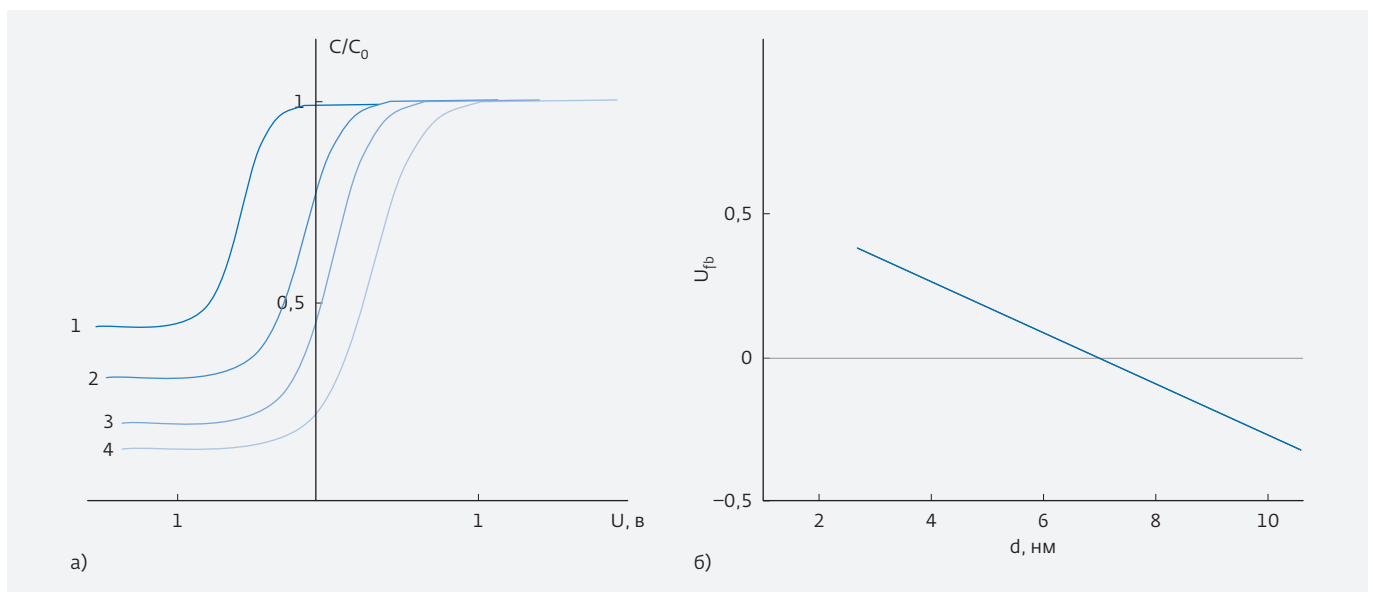


Рис. 2. Зависимость вольт-фарядных характеристик (а) и напряжения плоских зон (б) МДП-систем от толщины SiO_2 : 1 – $d = 10,8\text{ нм}$; 2 – $d = 9,0\text{ нм}$; 3 – $d = 7,7\text{ нм}$; 4 – $d = 3,8\text{ нм}$

Таблица. Изменение длины связи Si–O от угла связи Si–O–Si

D_{Si-O} (нм)	0,1662	0,1632	0,1615	0,1605	0,1598	0,1595	0,1594
Φ (град)	120	130	140	150	160	170	180

нентов [O]:[Si] и температурой. С другой стороны, свойства материальных тел представляют собой совокупность объемных и поверхностных свойств, что отмечено даже для образцов достаточно больших (см) размеров [8]. Особенно велика роль поверхностных эффектов в области микро- и наноразмеров в том числе для тонких и сверхтонких пленок [9].

Изменение оптических и электрофизических свойств SiO_2 в области толщин 6,0–7,5 нм можно объяснить тем, что при этих толщинах происходит переход от преимущественно поверхностных к преимущественно объемным свойствам диэлектрика.

При толщинах менее 6,0 нм определяющее влияние на суммарные свойства диоксида оказывают, очевидно, поверхностные явления. Известно, что в реальных условиях поверхность оксидных пленок гидратируется с образованием водородных связей. Это ведет к увеличению угла валентной связи Si–O–Si [10], что вызывает уменьшение межатомных расстояний Si–O (см. таблицу), то есть приводит к уплотнению структуры диэлектрика. Этот вывод подтверждается наблюдаемым в эксперименте увеличением критической напряженности поля и показателя преломления слоя с уменьшением его толщины (рис. 1).

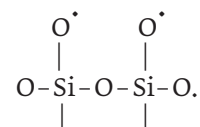
Адсорбция кислорода на хорошо развитой поверхности слоя приводит к формированию отрицательного заряда диоксида, часть которого идет на компенсацию положительного заряда ионов H^+ , Na^+ и др. Предположение о формировании отрицательного заряда подтверждается экспериментальной зависимостью величины напряжения плоских зон МДП-структуры от толщины диоксида при $d < 6$ нм (рис. 2). Этот вывод не противоречит данным [11].

При увеличении толщины SiO_2 возрастает роль объема и при достижении определенной толщины вклад поверхностных и объемных свойств выравнивается. Одновременно с увеличением толщины уменьшается концентрация ионов $[O^{2-}]$ в объеме SiO_2 . Вследствие этого слои с толщиной 6–7,5 нм должны обладать меньшими значениями показателя преломления и критического поля, а эффективный заряд должен быть близок к нулю, что и подтверждается экспериментально.

При дальнейшем увеличении толщины диэлектрика ($>7,5$ нм) все больше возрастает влияние объемных свойств. Значения показателя преломления и критического поля становятся близкими к значениям для слоев с толщиной >10 нм.

Уменьшение $[O^{2-}]$ приводит к доминирующему влиянию положительно заряженных примесей и структурных дефектов, обуславливающих положительный объемный заряд.

Для повышения структурно-примесной стабильности системы Si– SiO_2 необходимо привести ее в состояние устойчивого термодинамического равновесия. Для этого необходимо, чтобы в этой системе прошли релаксационные процессы, связанные с перестройкой ее структурно-примесного состава. Для проверки предположения о зависимости свойств тонких слоев SiO_2 от степени влияния поверхностных и объемных явлений был проведен следующий эксперимент: структуры Si– SiO_2 с толщиной диэлектрического слоя 4,6 и 7,7 нм 20 мин отжигались при давлении $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст и $T=700$ °C с целью изменения концентрации ОН-групп на поверхности слоя. После такого отжига объемный отрицательный заряд в обеих структурах увеличился (наблюдался сдвиг напряжения плоских зон от 0,3 до 0,9 В и от ~ 0 до 0,1 В для 4,6 и 7,7 нм соответственно). В рамках выдвинутых предположений этот результат можно объяснить дегидратацией поверхности с образованием отрицательно заряженных центров [6]:



Абсолютную разницу в измерениях можно объяснить различной величиной поверхности испытанных слоев.

Кроме описанных эффектов наблюдался сдвиг основной частоты колебания связи Si–O $\lambda=9,1$ мкм, найденный из ИК-спектров поглощения, на $\lambda=10$ см⁻¹ в сторону уменьшения. Эти факты можно объяснить уплотнением сетки тетраэдров SiO_4 , увеличением ближнего порядка в слое диэлектрика и ослаблением, вследствие этого, связи Si–O в этом тетраэдре. Уплотнение же упаковки тетраэдров, воз-

можно, объясняется десорбцией примесей из объема и залечиванием дефектов при отжиге. Аналогичные процессы описаны в [11].

Таким образом, результаты отжига в вакууме также соответствуют выдвинутым предположениям о характере влияния на свойства слоев SiO₂ поверхностных и объемных явлений.

Итак, в работе исследованы зависимости свойств тонких слоев диоксида кремния в интервале толщин 2,0–11,0 нм. Установлено, что наиболее существенные изменения как структурных, так и электрофизических свойств диоксида происходят при толщинах 6,0–7,5 нм. В рамках абсорбционной модели предложено объяснение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красников Г. Я., Зайцев Н. А.** Нанoeлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 1. С. 2–5.
2. **Красников Г. Я.** Исследование влияния материала верхнего электрода на свойства МДП структур // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / МИЭТ, М., 1989
3. **Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Матюшкин И. В.** Начальный этап окисления кремния и формирование пограничного слоя в системе Si-SiO₂ // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. № 2. С. 98–204.
4. **Зайцев Н. А., Шурчков И. О.** Структурно-примесные и электрофизические свойства системы Si-SiO₂. – М.: Изд. Радио и связь, 1993. С. 192.
5. **Красников Г. Я., Зайцев Н. А.** Система кремний-диоксид кремния субмикронных СБИС. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2003. 384 с.
6. **Киселев В. Ф.** Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках. – М.: Наука, 1970.
7. **Потапов Е. В., Раков А. В., Егорова Г. А., Иванова Н. С.** Оптика и спектроскопия. 1974. № 4.
8. **Йетс. Катализ.** Новые физические методы исследования // Сб. статей. – М., 1964.
9. **Волошин Ю. А., Смирнов Ю. П., Плотников Ю. И.** Исследование субтонких слоев двуокиси кремния на кремнии // В сб.: Электронные процессы на поверхности полупроводников и на границе раздела полупроводник – диэлектрик (по материалам симпозиума). АН СССР. СО. Институт физики полупроводников. Новосибирск: 1974. С. 224–227.
10. **Либау Ф.** Структурная химия силикатов. – М.: Мир, 1988. 410 с.
11. **Чопра К. Л.** Электрические явления в тонких пленках / Пер. с англ. – М., 1972.

ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ ВЕТВЯЩИХСЯ МОЛЕКУЛ ТРАНС-ПОЛИАЦЕТИЛЕНА

► М. Н. Журавлев, Т. С. Катаева
НИУ МИЭТ

С помощью *ab initio* моделирования методом функционала плотности исследовано изменение геометрии и энергетического спектра Y-разветвителя на основе молекулярных цепочек транс-полиацетилена при инъекции носителей заряда. Показано, что заряд локализуется в точке ветвления. Взаимодействие локализованных электронов и фононов приводит к понижению подвижности электронов проводимости.

TRANSPORT PROPERTIES OF ORGANIC SEMICONDUCTORS BASED ON BRANCHED MOLECULES OF TRANS-POLYACETHYLENE

M. N. Zhuravlev, T. S. Kataeva
NRU MIET

Modifications of geometry and energy spectrum at charge carries injection in the Y-splitter based on trans-polyacetylene molecular chains are researched by *ab initio* simulations using the density functional method. It is shown that the charge is localized at the branch point. The interaction of localized electrons and phonons leads to decrease in the mobility of conduction electrons.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной электроники тесно связано с созданием и использованием новых материалов. В последние годы благодаря интенсивным исследованиям был достигнут значительный прогресс в создании органических полупроводников с высокой подвижностью электронов [1]. Опытные образцы органических полевых транзисторов используются для управления матрицами OLED (organic light-emitting diode) на пластиковых подложках, создания RFID (radio frequency identification) меток и т. д. По своей природе органические полупроводники – низкотемпературные материалы. Из-за отсутствия ковалентных связей между молекулами они могут быть осаждены при температурах ниже 100–150 °С из газовой или жидкой фазы. Это делает подобные материалы совместимыми с печатными технологиями производства [2] и позволяет выполнять интегра-

цию с другими низкотемпературными объектами, например, биологическими молекулами.

Простейшим органическим полупроводником является полиацетилен. На его основе создаются квантовые провода, соединяющие донорный и акцепторный центры в молекулярных диодах [3] и нелинейных оптических материалах [4]. Также соединения на основе полиацетилена используются для организации транспорта электронов через клеточную мембрану. Наиболее распространенный способ модификации структуры и свойств базовой полимерной цепочки – сополимеризация с различными функциональными группами. При этом модифицированная молекула становится разветвленной. При комнатной температуре длина свободного пробега носителей заряда в полимерах – величина одного порядка с длиной молекулы. В работе [5] было показано,

что ветвление молекулы транс-полиацетилена приводит к локализации НОМО и LUMO орбиталей в окрестности точки ветвления. Это приводит к смене механизма проводимости с зонной на прыжковую, характерную для неупорядоченных, низкомолекулярных органических соединений и описываемую теорией переноса электронов Маркуса.

Несмотря на большое число исследовательских работ, описание кинетики носителей заряда в ветвящихся полимерах представляет собой актуальную задачу. Это связано как с протеканием сложных внутренних электрохимических процессов в молекуле при инжекции носителей заряда, так и с разнообразием возможных транспортных механизмов. В настоящей работе с помощью *ab initio* моделирования методом функционала плотности исследовано изменение геометрии и энергетического спектра ветвящейся молекулы транс-полиацетилена при инжекции носителей заряда. Показано, что взаимодействие локализованных электронов и фононов в точке ветвления приводит к понижению подвижности электронов проводимости. Понимание природы носителей заряда, механизма их переноса и факторов, которые ограничивают подвижность, имеет важное значение для проектирования и синтеза новых материалов с высокой подвижностью.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОЛЯРОНА

Простейшая ветвящаяся структура на основе линейных молекул полиацетилена – Y-разветвитель. Структурная схема Y-разветвителя показана на вставке рис. 1. Атом углерода в точке ветвления обладает sp^2 -гибридизованными валентными орбиталями и соединяется с одной из ветвей разветвителя двойной связью. В общем случае проводимость молекулярной структуры зависит от электронной структуры контактов. В последние годы были разработаны технологии «невозмущающих» контактов, содержащих, в частности, молекулярные мостики с атомами золота или серы, ограничивающие влияние контактирующих проводников на молекулу. При этом основные особенности вольт-амперной характеристики квантового проводника обусловлены именно молекулярной структурой. Поэтому в данной работе мы ограничимся исследованием Y-разветвителя без учета влияния контактов.

При инжекции носителей заряда в ветвящуюся молекулу полиацетилена происходит реорганизация длин одинарных и двойных связей и обра-

зование полярона. Заряд локализуется в областях деформации решетки. Транспорт носителей заряда определяется электрон-фононным взаимодействием. Вначале электрон переходит в возбужденное состояние Франка-Кондона, а затем безызлучательно релаксирует в основное состояние. Перенос электронов объясняется теорией Маркуса и ее модификациями [6]. Для квазиодномерного проводника с постоянной решеткой a зависимость подвижности от температуры равна:

$$\mu = \frac{ea^2 J^2}{2\hbar(k_B T)^{3/2}} \sqrt{\frac{\pi}{\lambda}} e^{-\frac{\lambda}{4k_B T}}, \quad (1)$$

где λ – энергия реорганизации среды при образовании полярона, J – интеграл перескока. Для дырки интеграл перескока J может быть экспериментально найден из закона дисперсии НОМО орбитали молекулярной п-п стэкинг-системы или из расщепления уровня НОМО орбитали димерной молекулы. Энергия реорганизации среды λ – геометрическая энергия релаксации, связанная с изменением молекулярной геометрии от равновесного нейтрального к равновесному заряженному состоянию. Она равна удвоенной энергии связи полярона и может быть выражена через

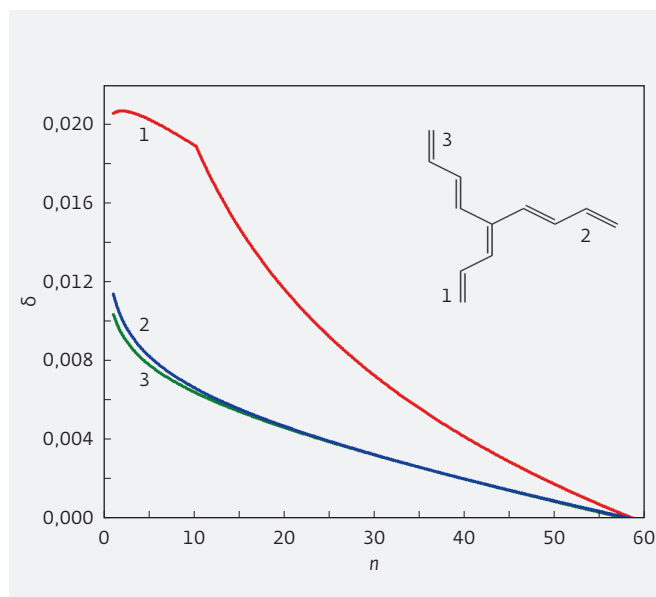


Рис. 1. Усредненное искажение решетки δ , связанное с отрицательно заряженным поляроном в Y-разветвителе. Красная линия – 1 ветвь, соединенная двойной связью с точкой ветвления; зеленая и синяя линии – 2 и 3 ветви, соединенные одинарной связью с точкой ветвления

энергию нейтральной (E) и заряженной (E^-) молекулы, рассчитанной как для ядерной конфигурации основного состояния нейтральной (M), так и заряженной молекулы (M^-)

$$\lambda = E^-(M) - E^-(M^-) + E(M^-) - E(M) = \frac{1}{2} \sum_s \hbar \omega_s g_s^2, \quad (2)$$

где g_s – константа локального электрон-фононного взаимодействия.

Рассмотрим равновесное положение поляронов в Y -разветвителе. Будем использовать *ab initio* моделирование методом теории функционала плотности (DFT). Обменно-корреляционные составляющие полной энергии учитывались с помощью гибридного функционала B3LYP, дающего наилучшее соответствие энергии НОМО и LUMO орбиталей экспериментальным данным. Структура многоэлектронной волновой функции выбиралась аналогичной методу Хартри-Фока (RHF). Использовался базисный набор 6-31 G.

В нейтральном разветвителе длины одинарной и двойной связей соответствуют линейной молекуле полиацетилена и равны 1,424 Å и 1,366 Å. Небольшие отклонения возникают вблизи точки ветвления и концов цепочек. Для описания изменения длин связей при внедрении электрического заряда введем параметр δ , определяемый соотношением $\delta = |l_n - l_{n0}|$. Здесь l_n – длина n -ной химической связи в заряженном разветвителе, l_{n0} – в нейтральном. На рис. 1 показано значение параметра δ для трех ветвей отрицательно заряженного разветвителя. Из графика видно, что заряд локализуется по преимуществу в ветви 1, соединенной двойной связью с точкой ветвления. В этой ветви, вблизи точки ветвления, длины одинарных и двойных связей выравниваются до 1,4 Å. Точка ветвления является аналогом потенциальной ямы для носителей заряда.

В сопряженных полимерах образование заряженных состояний в запрещенной зоне требует меньшей энергии, чем заселение LUMO орбитали. При этом происходит перестройка структуры заполненных энергетических уровней. Сравнение энергетических спектров нейтрального и заряженного разветвителей приведено на рис. 2. Из графика видно, что НОМО орбиталь смещается в запрещенную зону, образуя поляронное состояние. Энергии заполненных p -орбиталей также повышаются. Подобным образом происходит перестройка уровней, когда акцептор забирает один электрон с НОМО орбитали. Особо следует отметить, что в отличие от линейной молекулы,

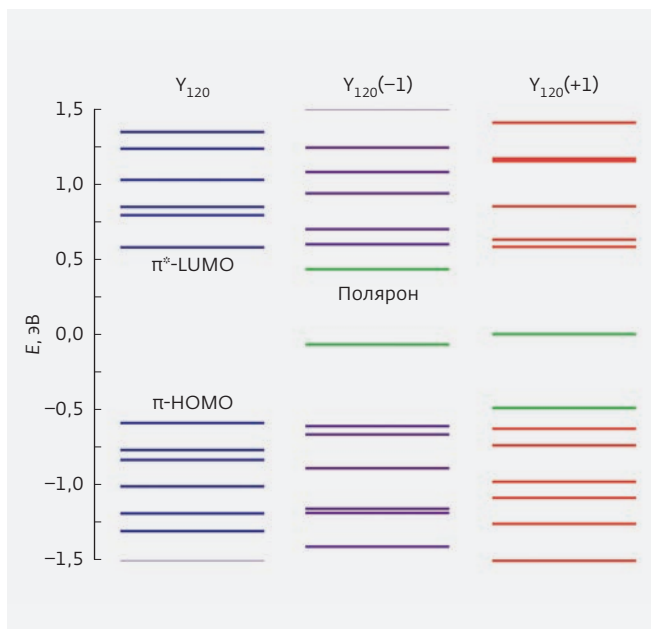


Рис. 2. Энергетические спектры нейтрального и заряженного Y -разветвителей, содержащих 120 атомов углерода

поляронные уровни расположены несимметрично относительно середины запрещенной зоны. В зависимости от типа допирования один из уровней смещается ближе к центру зоны.

Изменение положения уровней является следствием межэлектронных корреляций, вызванных слабым экранированием кулоновского потенциала [7]. Расчеты, выполненные методом теории функционала плотности без учета взаимодействия электронов, дают симметричное положение уровней относительно середины запрещенной зоны. Сравнение длин связей показывает, что в ветви 1 вблизи точки ветвления происходит смена порядка чередования одинарных и двойных связей. В результате в электронном спектре появляется нулевая мода. Энергетический уровень данного состояния расположен вблизи середины запрещенной зоны. Волновая функция равна нулю для четных атомов углерода, считая от точки ветвления, в зависимости от длин ветвей разветвителя. При переходе через ноль фаза волновой функции меняется на π . Подобное поведение волновой функции свойственно солитонам в линейной молекуле полиацетилена [8].

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ФОНОНОВ

В сопряженных полимерах электронные состояния сильно связаны с ядерными колебаниями.

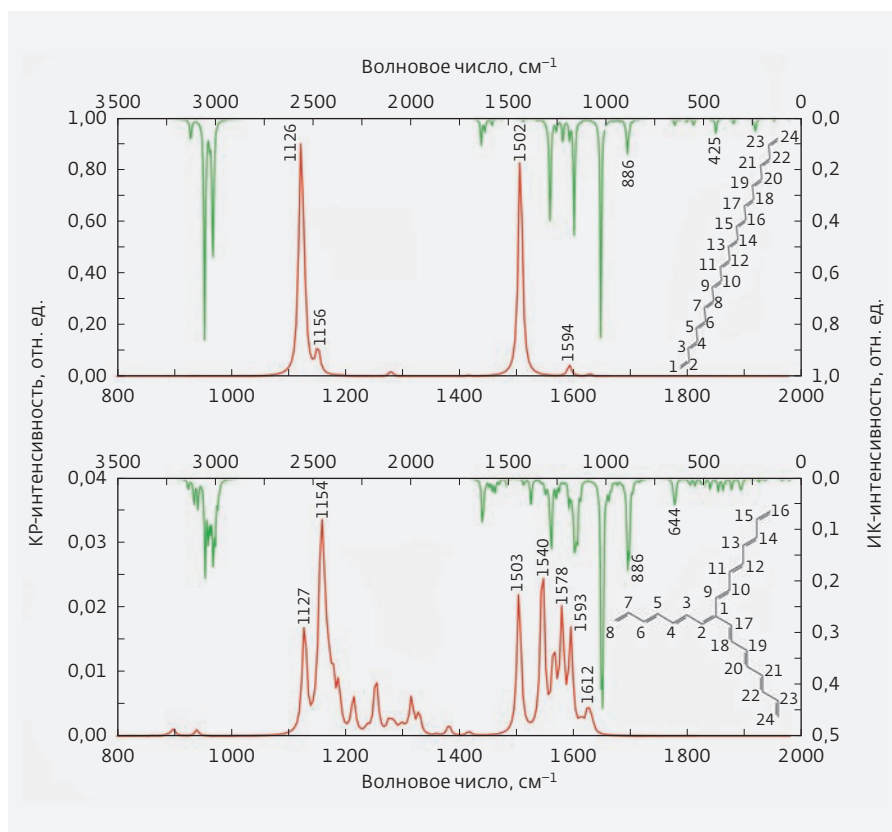


Рис. 3. Сравнение ИК- и КР-спектров линейной молекулы сопряженного полимера (сверху) и Y-разветвителя (снизу), имеющих одинаковое количество атомов

Большое число экспериментальных и теоретических исследований показали, что в полимерах электрон-фононные взаимодействия сопоставимы или даже больше, чем электронные взаимодействия. Прямые экспериментальные доказательства связанности дырок НОМО орбитали и фононов в пленке органического полупроводника были опубликованы в 2002 году [9]. Измерения проводились методом ультрафиолетовой фотоэмиссионной спектроскопии. Вблизи пика, соответствующего НОМО орбитали, были обнаружены линии-спутники, соответствующие колебательным уровням. Электрон-фононное взаимодействие приводит к изменению частот нормальных колебаний атомов углерода. Важным следствием этого взаимодействия является релаксация ядерной геометрии после перехода $p \rightarrow p^*$. Этот эффект проявляется в рамановских и ИК-спектрах.

Сравним колебательные спектры линейной молекулы полиацетилена и Y-разветвителя, состоящих из 24 атомов углерода. Расчеты выполнены для возбуждающего лазерного излучения с дли-

ной волны 785 нм, являющегося типичным для современных рамановских спектрометров. Количество нормальных мод N в каждой из этих двух структур составляет 144. При сравнении ИК-спектров линейной молекулы и разветвителя наблюдается сильная корреляция, чего нельзя сказать о спектрах КР, в которых наблюдаются значительные различия (рис. 3). Рамановские спектры линейной молекулы полиацетилена имеют четко выраженную структуру с двумя сильными линиями, соответствующими нормальным модам ν_1 и ν_3 [10]. Эти полосы связаны с фоном A_g . Доминирующий вклад в моду ν_1 (1502 см^{-1}) вносит растяжение двойных связей, а в моду ν_3 (1126 см^{-1}) – растяжение одинарных связей. В разветвителе дополнительно появляется несколько сильных пиков в области $1500\text{--}1650 \text{ см}^{-1}$.

Колебательные моды, соответствующие точке ветвления, являются локальными, в отличие от делокализованных нормальных колебаний. Для поиска локальных мод используется разложение нормальных колебаний по внутренним координатам [11]. На рис. 4 показано распределение амплитуд колебаний атомов углерода для частот, соответствующих пикам рамановского и ИК-спектров разветвителя. Из графиков видно, что точке ветвления соответствует локальный максимум распределения. Локализация также подтверждается распределением потенциальной энергии по внутренним координатам, отраженным в таблице. Числами указан вклад (%) колебания по внутренним координатам, ν – растяжение, δ – изгиб, τ – вращение. Локализованные фононы обладают большей частотой по сравнению с модами ν_1 и ν_3 . При сильной дефектности полиацетилена локализованные фононы будут проявляться в виде дополнительного уширения спектральных линий, соответствующих двум главным максимумам рамановских спектров. Уширение происходит в более высокочастотную область спектра.

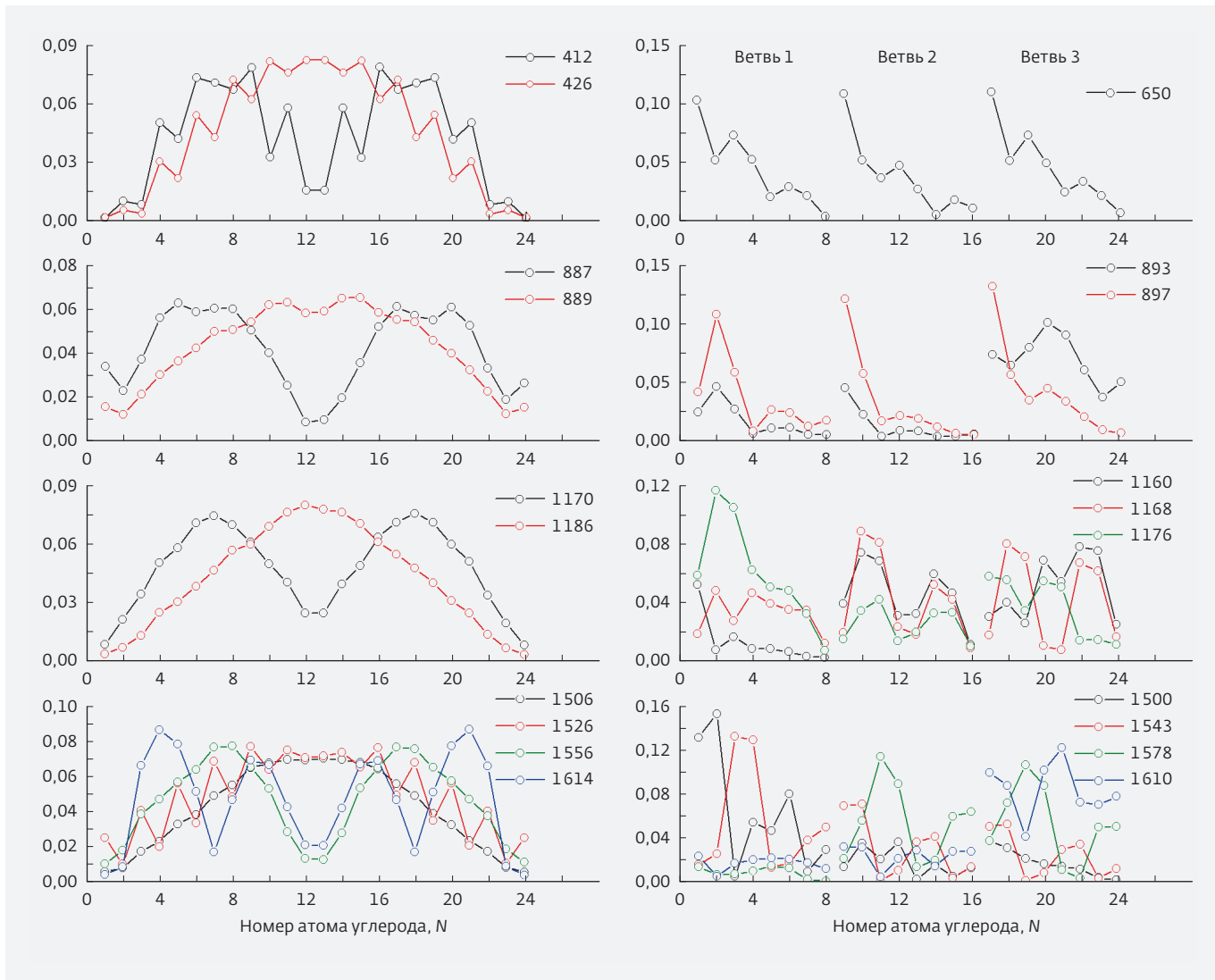


Рис. 4. Амплитуды колебаний атомов углерода в линейной молекуле (слева), содержащей 24 атомов углерода, и в Y-разветвителе (справа) для трех ветвей, содержащих по 8 атомов углерода

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОДВИЖНОСТИ

Используя найденные равновесные геометрии нейтрального и заряженного Y-разветвителей по формуле (2), были рассчитаны значения энергии реорганизации молекул λ с учетом вкладов от всех индивидуальных колебательных мод. Внутримолекулярные моды соответствуют локальным молекулярным искажениям, связанным с введением заряда. Расчеты показали, что энергия реорганизации зависит от молекулярной структуры и полярности носителя заряда, λ имеет тенденцию к уменьшению с увеличением длины ветвей. Было обнаружено, что при инжекции электронов в Y-разветвитель с ветвями, содержа-

щими 40 атомов углерода, $\lambda_{n40} = 0,206$ эВ, а для Y-разветвителя с ветвями, содержащими 10 атомов углерода, $\lambda_{n10} = 0,24$ эВ, то есть возмущение, вносимое в молекулярную структуру носителями заряда, уменьшается с увеличением длины ветвей разветвителя. Инжекция дырок сопровождается меньшими возмущениями молекулярной структуры разветвителя: $\lambda_{p40} = 0,18$ эВ, $\lambda_{p10} = 0,205$ эВ. Энергия образования полярона $E_{pol} = \lambda/2$. При комнатной температуре E_{pol} в несколько раз превосходит температурный потенциал. Это придает устойчивость полярону к воздействию тепловых флуктуаций. Из формулы (1) следует, что проводящие свойства пленок полиацетилена лимитируются степенью разветвленности молекулярных цепочек.

Распределение потенциальной энергии основных нормальных мод по внутренним координатам в линейной молекуле и в Y-разветвителе

Линейная молекула		Y-разветвитель	
Частота, см ⁻¹	Типы колебаний	Частота, см ⁻¹	Типы колебаний
412	$\tau(C_{19}-C_{18}-C_{17}-C_{16})$ 18, $\tau(C_9-C_8-C_7-C_6)$ 18, $\tau(C_{17}-C_{16}-C_{15}-C_{14})$ 12, $\tau(C_{11}-C_{10}-C_9-C_8)$ 12, $\tau(C_7-C_6-C_5-C_4)$ 12, $\tau(C_{21}-C_{20}-C_{19}-C_{18})$ 12	650	$\delta(C_{17}-C_1-C_2)$ 19, $\delta(C_1-C_{17}-C_{18})$ 13, $\delta(C_9-C_{10}-C_{11})$ 11,
426	$\tau(C_{13}-C_{12}-C_{11}-C_{10})$ 20, $\tau(C_{15}-C_{14}-C_{13}-C_{12})$ 20, $\tau(C_{17}-C_{16}-C_{15}-C_{14})$ 17, $\tau(C_{11}-C_{10}-C_9-C_8)$ 17,	893	$\tau(C_{21}-C_{19}-C_{20}-H)$ 27, $\tau(C_{20}-C_{22}-C_{21}-H)$ 20, $\tau(C_{18}-C_{20}-C_{19}-H)$ 10, $\tau(C_1-C_{18}-C_{17}-H)$ 9
887	$\tau(H-C_5-C_6-C_4)$ 10, $\tau(H-C_{20}-C_{19}-C_{21})$ 9, $\tau(H-C_8-C_7-C_9)$ 8, $\tau(H-C_{17}-C_{18}-C_{16})$ 8, $\tau(H-C_4-C_3-C_5)$ 8	897	$\nu(C_1-C_9)$ 21, $\nu(C_1-C_{17})$ 20, $\nu(C_1-C_2)$ 8
889	$\tau(H-C_{14}-C_{15}-C_{13})$ 9, $\tau(H-C_{11}-C_{12}-C_{10})$ 8, $\tau(H-C_{10}-C_9-C_{11})$ 8, $\tau(H-C_{15}-C_{16}-C_{14})$ 8	1160	$\nu(C_{22}-C_{23})$ 12, $\nu(C_{10}-C_{11})$ 12, $\nu(C_{20}-C_{21})$ 7
1170	$\nu(C_{18}-C_{19})$ 14, $\nu(C_6-C_7)$ 14, $\nu(C_{16}-C_{17})$ 13, $\nu(C_8-C_9)$ 12	1168	$\nu(C_{10}-C_{11})$ 19, $\nu(C_{18}-C_{19})$ 12, $\nu(C_{22}-C_{23})$ 7
1186	$\nu(C_{12}-C_{13})$ 16, $\nu(C_{14}-C_{15})$ 15, $\nu(C_{10}-C_{11})$ 15, $\nu(C_8-C_9)$ 10	1176	$\nu(C_2-C_3)$ 29, $\nu(C_1-C_{17})$ 7, $\nu(C_{20}-C_{21})$ 7, $\nu(C_4-C_5)$ 7
1506	$\nu(C_{11}=C_{12})$ 6, $\nu(C_{13}=C_{14})$ 6, $\nu(C_9=C_{10})$ 5, $\nu(C_{15}=C_{16})$ 5	1500	$\nu(C_1=C_2)$ 30, $\delta(C_1-C_2-H)$ 22, $\nu(C_5=C_6)$ 7,
1526	$\nu(C_{13}=C_{14})$ 11, $\nu(C_{11}=C_{12})$ 11, $\nu(C_{15}=C_{16})$ 10, $\nu(C_9=C_{10})$ 10	1543	$\nu(C_3=C_4)$ 27, $\delta(C_3-C_4-H)$ 10, $\nu(C_9=C_{10})$ 9, $\delta(H_{26}-C_3-H_{33})$ 9
1556	$\nu(C_7=C_8)$ 8, $\nu(C_{17}=C_{18})$ 7, $\nu(C_{19}=C_{20})$ 5, $\nu(C_5=C_6)$ 5	1578	$\nu(C_{11}=C_{12})$ 17, $\nu(C_{19}=C_{20})$ 15, $\nu(C_{15}=C_{16})$ 8
1614	$\nu(C_{21}=C_{22})$ 8, $\nu(C_3=C_4)$ 8, $\nu(C_{15}=C_{16})$ 7, $\nu(C_9=C_{10})$ 7	1610	$\nu(C_{19}=C_{20})$ 18, $\nu(C_{17}=C_{18})$ 16, $\nu(C_{21}=C_{22})$ 16, $\nu(C_{23}=C_{24})$ 11

При транспорте электронов через LUMO орбиталь наличие точек ветвления приводит к уменьшению подвижности носителей заряда в 5-7 раз.

Таким образом, изменяя степень ветвления молекул полиацетилена, можно в широких пределах управлять проводимостью материала. При низкой концентрации ветвящихся цепочек, полиацетилен сохраняет свои высокопроводящие свойства, а разветвитель можно рассматривать как одиночный дефект. При большой концентрации ветвящихся молекул в пленке полиацетилена мы получаем низкопроводящий материал. Таким образом, умение управлять концентрацией и порядком Y-разветвителей в полимерной цепи расширяет возможности практического использования сопряженных полимерных материалов с п-связями.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ostroverkhova O., Cooke D. G., Hegmann F. A., Anthony J. E., Podzorov V., Gershenson M. E., Jurchescu O. D., Palstra T. T. M.** Ultrafast carrier dynamics in pentacene, functionalized pentacene, tetracene, and rubrene single crystals // *Appl. phys. lett.* 2006. Vol. 88. P. 162101.
2. **He Ya.** A high-mobility electron-transporting polymer for printed transistors // *Nature.* 2009. Vol. 457. P. 679-686.
3. **Meisner J. S., Kamenetska, M.; Krikorian M., Steigerwald M. L., Venkataraman L., Nuckolls C.** A single-molecule potentiometer // *Nano lett.* 2011. Vol. 11. P. 1575-1579.
4. **Стид Дж.В., Этвуд Дж.Л.** Супрамолекулярная химия / Пер. с англ.: в 2 т. - М.: ИКЦ «Академ-книга», 2007. 416 с.

5. **Горбацевич А. А., Журавлев М. Н., Катаева Т. С., Кобрянский В. М.** Локализованные электроны и фононы в ветвящихся молекулах полиацетилена // Российские нанотехнологии. 2016. Т. 11. № 11–12. С. 121–127.
6. **Troisi A.** Charge transport in high mobility molecular semiconductors: classical models and new theories // Chem. soc. rev. 2011. Выд. 40. P. 2347–2358.
7. **Тихонов Е. В., Успенский Ю. А., Хохлов Д. Р.** Вычисление спектра квазичастичных электронных возбуждений в органических молекулярных полупроводниках // ЖЭТФ. 2015. Т. 147. № 6. С. 1262–1270.
8. **Heeger A. J., Kivelson S., Schrieffer J. R., Su W. P.** Solitons in conducting polymers // Reviews of Modern Physics. 1988. Vol. 60. № 3. P. 781–850.
9. **Kera S., Yamane H., Sakuragi I., Okudaira K. K., Ueno N.** Very narrow photoemission bandwidth of the highest occupied state in a copper-phthalocyanine monolayer // Chem. phys. lett. 2002. Vol. 364. P. 93–98.
10. **Castiglioni C., Tommasini M., Zerbi G.** Raman spectroscopy of polyconjugated molecules and materials: confinement effect in one and two dimensions // Phil. trans. R. soc. Lond. A. 2004. Vol. 362. P. 2425–2459.
11. **Zou W., Kalescky R., Kraka E., Cremer D.** Relating normal vibrational modes to local vibrational modes with the help of an adiabatic connection scheme // The journal of chemical physics. 2012. Vol. 137. P. 084114.

Международный форум «Микроэлектроника – 2017» и Научная конференция «Микроэлектроника – ЭКБ и электронные модули»

Программа конференции

- Секция 1. Навигационно-связные СБИС и модули
- Секция 2. Высокопроизводительные вычислительные системы
- Секция 3. Информационно-управляющие системы
- Секция 4. Технологии и компоненты микро- и нанoeлектроники
- Секция 5. Изделия микроэлектроники общего и специализированного назначения
- Секция 6. Методы и алгоритмы САПР СБИС
- Секция 7. СВЧ интегральные схемы и модули
- Секция 8. Микросистемы

Дата проведения:

02–07 октября 2017 года

Место проведения:

**г. Алушта (Республика Крым),
отель Riviera Sunrise Resort & SPA**

Оператор Форума и конференции:

Компания «ПрофКонференции»

Телефон/факс: +7 (495) 641 57 17

E-mail: info@microelectronica.pro

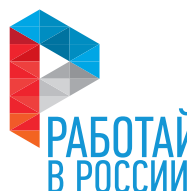
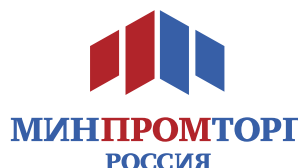
Подробная информация и регистрация участников на официальном сайте Форума: microelectronica.pro



НИИМЭ
НИИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ



ПРОГРЕСС
НИИ микроэлектронной аппаратуры



Международный форум «Микроэлектроника – 2017»
и Научная конференция «Микроэлектроника – ЭКБ и электронные модули»

Внимание авторов докладов Конференции!

Сообщаем, что материалы конференции будут загружаться в систему РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) и в международную систему Web of Science. Свои публикации Вы сможете увидеть на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/>).

В связи с этим к материалам, высылаемым на Конференцию, предъявляются требования такие, как ко всем научным статьям, публикуемым в РИНЦ:

- сведения об авторах (ФИО-полностью, e-мэйл, ученое звание, должность, место работы, веб-адрес организации) на русском и англ. языках;
- сведения о статье (УДК, название – до 6 слов, аннотация – до 4-х строк, ключевые слова – до 10 слов) на русском и английском языках);

- по статье. Грамотность (запятые и падежи) и научность результатов исследований остаются на совести авторов;
- по комплектности. Кроме заявки, статьи и платёжного поручения, необходимо выслать в адрес Оргкомитета отсканированный лицензионный договор (согласие авторов на публикацию статьи в открытом доступе), а также экспертные заключения отдельно на тезисы и статьи;
- для размещения докладов в Web of Science необходимо наличие полного текста статьи на английском языке.

Представление докладов и тезисов

При оформлении работ просим Вас соблюдать следующие требования:

- формат А4, шрифт Times New Roman 10 пт, через 1 интервал, с соблюдением полей: по левому краю 20 мм, по правому – 15 мм, сверху и внизу 15 мм, ориентировочно 95 знаков в строке.
- Рисунки и схемы необходимо прислать уже размещенными внутри текста статьи, а также отдельными файлами.
- Рисунки, выполненные в Word, присылать на отдельных страницах.
- На первой странице указываются: на русском и английском языках название доклада (не более 6 слов), ФИО авторов (полностью), ученая степень, должность, место работы, аннотация (не более 4 строк), ключевые слова (до 10 слов).

- Кроме того следует указать контактные данные каждого автора (телефон, e-mail), сайт организации, почтовый адрес с указанием индекса и УДК статьи. Статья может быть объемом до 10 страниц.
- В тексте должна быть указана цель работы, суть обсуждаемой проблемы, предложения, рекомендации и выводы, сделанные автором, список использованной литературы оформляется по ГОСТ Р 7.0.5-2008.
- Отдельный раздел должен быть посвящен новизне результатов, полученных авторами. Этот раздел должен начинаться словами: «Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:...».
- Для тезисов установлен объем до трех страниц формата А4 с соблюдением тех же правил оформления текста, что и для статей.



XII научно-техническая конференция «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе»

14-1 сентября 2017 года ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» проводит XII научно-техническую конференцию молодых специалистов Росатома «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе». Конференция включена в отраслевой «План проведения научных и научно-технических мероприятий Госкорпорации «Росатом» на 2017 год» (п. 51 Отраслевого «Плана...» приказ от 28.02.2017 № 1/183-П) и пройдет в рамках деловой программы VI Международного бизнес-саммита на «Нижегородской ярмарке».

Цель проведения конференции – формирование научно-технического потенциала молодых ученых, укрепление связей между ведущими предприятиями России.

Дата проведения:
14–16 сентября 2017г.

Работу конференции планируется организовать по следующим направлениям:

- автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП);
- электротехническое и энергетическое оборудование;
- разработка и автоматизация производственных технологических процессов;
- микроэлектроника;
- информационные технологии;
- приборостроение;
- безопасность атомной отрасли;
- ПСР – проекты. Идеи и опыт реализации.

Место проведения:
г. Нижний Новгород

ХII научно-техническая конференция
**«Высокие технологии атомной отрасли.
 Молодежь в инновационном процессе»**

Требования к оформлению тезисов докладов

Объем тезисов не должен превышать 2 страницы формата А4. Тезисы набираются в редакторе Microsoft Word.

Поля

Верхнее – 1,8, нижнее – 1,8, снаружи – 1,8, внутри – 2,0, зеркальные поля.

Нумерация страниц внизу по центру.

Текст

Шрифт Times New Roman, 12 пт, абзацный отступ (красная строка) 1 см, интервал текста одинарный, выравнивание по ширине.

Заглавие

В заглавии тезисов на первой строке пишутся инициалы (на первом месте) и фамилии авторов (между инициалами пробел не ставится), шрифт полужирный, курсив, выравнивание по центру. Докладчик не подчеркивается. Точка в конце не ставится. Строка отделяется интервалами: «до» – 6 пт и «после» – 6 пт (раздел «Разметка страницы» в Word).

На следующей строке пишется название тезисов, шрифт полужирный, выравнивание по центру. Точка в конце не ставится. Строка отделяется интервалами: «до» – 6 пт и «после» – 6 пт.

На следующей строке пишется название организации, шрифт курсив, выравнивание по центру. Точка в конце не ставится. Если организаций несколько, то они впереди нумеруются надстрочными арабскими цифрами. При этом после фамилий авторов соответствующими надстрочными арабскими цифрами указывается их принадлежность к той или иной организации. Строка отделяется интервалами: «до» – 6 пт и «после» – 6 пт.

Формулы

Формулы выполняются средствами Microsoft Equation. Настройка символов в редакторе аналогична основному тексту.

Таблицы

Таблицы выравниваются по центру. Перед таблицей пишется слово «Таблица», пробел, номер таблицы, точка, название таблицы. Точка в конце не ставится. Название выравнивается по центру и отделяется интервалами: «до» – 6 пт и «после» – 6 пт.

Рисунки

Рисунки должны быть вставлены в текст в готовом виде. Не допускаются рисунки (в том числе схемы), созданные в Word.

Положение рисунка (обтекание текстом) – «в тексте». Выравнивание по центру. Рисунок отделяется интервалом «до» – 6 пт.

Под рисунком размещается его название. Пишется «Рис.», пробел, номер рисунка, точка. Далее следует название рисунка. Точка в конце не ставится. Название выравнивается по центру и отделяется интервалами: «до» – 6 пт и «после» – 6 пт.

Не допускается при нумерации рисунков использовать номера вида «рис. 1.1», «рис. 2.3.1.», «рис. 1а», «рис. б» и т.д.

Ссылки в тексте

Таблицы и рисунки нумеруются по порядку упоминания их в тексте, например табл. 2 или рис. 3.

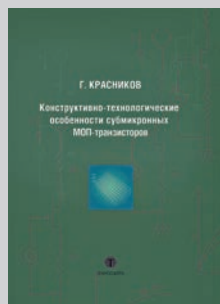
В тексте ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках, например [1], [1-5; 9].

Пример списка литературы

1. Овчинников И. В., Петров Ю. Г., Иванов Г. И. и др. // Докл. АН СССР. 1984. Т. 276. С. 126-128.
2. Williams D. E., Houpt D. J. // Acta Cryst. B. 1986. Vol. 42. P. 286-288.

Разное

При выравнивании по центру заглавия тезисов (всех трех строк), таблиц, рисунков и их названий абзацный отступ (красную строку) убирают.



Цена 1188 руб.

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СУБМИКРОННЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Изд. 2-е, испр.

Г. Красников

*Издание осуществлено при поддержке
ОАО «НИИ молекулярной электроники и завод «Микрон»*

В книге рассмотрены особенности работы субмикронных МОП-транзисторов, описаны направления развития и ограничения применения методов масштабирования транзисторов, представлены требования к подзатворным диэлектрикам технологии их формирования, различные конструкции сток-истоковых областей МОПТ и технологические процессы создания мелкозалегающих легированных слоев. Рассмотрены проблемы влияния масштабирования размеров элементов в субмикронную область и особенностей технологических процессов на надежность и долговечность субмикронных МОП-транзисторов. Представлены данные о влиянии технологических процессов изготовления субмикронных СБИС (процессов плазменной обработки, ионного легирования и технологических операций переноса изображения) на деградацию подзатворного диэлектрика, а значит – на уровень выхода, надежность и долговечность годных готовых изделий.

Книга предназначена для специалистов в области проектирования и разработки технологии изготовления КМОП СБИС, а также для студентов старших курсов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2011. – 800 с.,
ISBN 978-5-94836-289-2

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ As В Si ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ СТРУКТУР SiO₂-Si

Выполнен анализ эффекта накопления As в приповерхностных слоях Si при имплантации структур SiO₂-Si. Показано, что в ситуации когда средний проницаемый пробег As лежит вблизи границы SiO₂-Si эффект является следствием устойчивого разделения радиационных пар Френкеля – вакансий и собственных междоузельных атомов Si по разные стороны границы SiO₂-Si. Построена модель, в основе которой лежит массоперенос As в составе пар As-I, качественно и количественно описывающая эффект накопления As в приповерхностных слоях Si.

Ключевые слова: имплантация в многослойные структуры, эффект разделения пар Френкеля (V и I), диффузия As в SiO₂-Si

Сведения об авторах:

Баранов Глеб Владимирович; Московский физико-технический институт (Государственный университет), 141700, Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9; Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1; gbaranov@mikron.ru

Итальянцев Александр Георгиевич; доктор физико-математических наук; профессор; Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1 aitalyantsev@mikron.ru

Песков Шандор Григорьевич; Московский физико-технический институт (Государственный университет), 141700, Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9, sandor-p@mail.ru

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ КОНТАКТОВ К КАРМАНАМ В ИНВЕРТОРЕ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТИРИСТОРНОГО ЭФФЕКТА, ВЫЗВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Рассматривается эффект радиационно-индуцированной защелки, вызванной воздействием тяжелых заряженных частиц в инверторе, выполненном по объемной КМОП-технологии с проектной нормой 90 нм. Проанализировано возникновение тиристорного эффекта в зависимости от расположения контактов к n- и p-карманам в структуре. Подробно описано растекание заряда в структуре при падении заряженной частицы, по результатам которого предложены топологические решения, направленные на повышение устойчивости инвертора к тиристорному эффекту (ТЭ). Рассматриваются два варианта расположения контактов: контакт к p-карману в центре, к n-карману – с краю структуры; контакт к p-карману с краю, к n-карману – в центре структуры. Показано, что инвертор, выполненный по второму варианту топологии, обладает большей стойкостью к ТЭ, поскольку защелка не удерживается в структуре из-за медленного процесса диффузии дырок из правой части p+-истока. При этом в левой части p+-истока потенциал высокий ввиду расположения контакта к n-карману в центре структуры, и концентрация дырок там пренебрежимо мала. Если оба контакта к p-карману и n-карману находятся в центре инвертора, то можно добиться лучшей стойкости, однако вследствие правил проектирования для технологии с проектной нормой 90 нм площадь такого инвертора будет существенно выше.

Ключевые слова: радиационно-индуцированная защелка, ТЗЧ, Sentaurus TCAD

Сведения об авторах:

Панышев Кирилл Андреевич, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.12, стр. 1, kpanyshv@mikron.ru

REDISTRIBUTION EFFECTS OF ION IMPLANTED AS IN SiO₂-Si STRUCTURE

The effect of As accumulation in the near-surface silicon layers after ion implantation of SiO₂-Si structures is analyzed. It is shown that the effect is due to Frenkel pairs stable splitting on opposite sides of the SiO₂-Si interface. A model of As accumulation effect is developed, which is based on the mass transfer of As in the As-I pairs.

Keywords: ion implantation into multilayer structures, effect of Frenkel pairs splitting, As diffusion in SiO₂-Si

Data of authors:

Baranov Gleb V.; Moscow Institute of physics and technology (State university), 141700, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia; Molecular Electronic Research Institute, SC 124460 12/1 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia; gbaranov@mikron.ru

Italyansev Alexander Grigorevich; Doctor of Science; professor; Molecular Electronic Research Institute, SC 124460 12/1 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia; aitalyantsev@mikron.ru

Peskov Shandor Grigorevich, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 141701, Russia, Dolgoprudny, Institutskiy per. 9; sandor-p@mail.ru

THE INFLUENCE OF THE WELL TIE LOCATION IN INVERTER ON THE OCCURRENCE OF THE THYRISTOR EFFECT CAUSED BY HEAVY IONS STRIKE

The effect of a radiation-induced latchup caused by the heavy ions strike in an inverter made on bulk 90 nm CMOS technology is considered. The occurrence of the thyristor effect depending on the location of the n- and p-well ties in the structure is analyzed. The charge spreading in the structure after heavy ion strike is thoroughly described, on the basis of which topological solutions aimed on increasing the stability of the inverter to the thyristor effect (TE) were suggested. Two versions of well tie location are considered: p-well tie in the center, n-well tie – at the edge of the structure; p-well tie at the edge, n-well tie – in the center. It is shown that the inverter made on the second type of topology shows more endurance to TE since the latchup is not sustained in the structure due to the slow process of hole diffusion from the right side of the p+ source. In this case, the potential on the left of the p+ source is high because of the n-well tie location at the center of the structure, and the hole concentration is negligible there. If both well ties are placed in the center of the inverter, then one can achieve better radiation hardness, however due to the design rules of 90 nm technology the area of such inverter would be much bigger.

Keywords: Radiation-induced latchup, heavy charged particles, Sentaurus TCAD

Data of authors:

Panyshv Kirill Andreevich, Molecular Electronics Research Institute Stock Company, 1-y Zapadny Proezd 12/1, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, kpanyshv@mikron.ru

ЭФФЕКТ ЛОКАЛЬНОГО ОТСУТСТВИЯ СИЛИЦИДА КОБАЛЬТА В КМОП-ТЕХНОЛОГИИ

В работе рассматривается негативный физический эффект, возникающий при увеличении степени интеграции в узле формирования силицида кобальта. Показан технологический способ устранения негативного эффекта и полученные результаты в маршруте изготовления КМОП 90 нм.

Ключевые слова: силицид кобальта, дефектность, ПХ-защитка

Сведения об авторах:

Арилин Роман Александрович; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: rarilin@mikron.ru

Котекина Светлана Николаевна; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: skotekina@mikron.ru

Коротова Ирина Александровна; Публичное акционерное общество «Микрон», 124460, Россия, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: ikorotova@mikron.ru

Поляков Александр Николаевич; Публичное акционерное общество «Микрон», 124460, Россия, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: apolyakov@mikron.ru

Горбатов Андрей Александрович; Публичное акционерное общество «Микрон», 124460, Россия, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: agorbatov@mikron.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ МИКРОМОДУЛЕЙ НА ГИБКОЙ КОММУТАЦИОННОЙ ПЛАТЕ

Создана технология изготовления микромодулей на основе бескорпусных многовыводных больших интегральных схем (БИС) с шариковыми выводами, смонтированных на гибкой плате. Проведено моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) материалов микромодуля и исследовано влияние размера шариковых выводов на прочность и долговечность. Проведены испытания микромодулей. Даны рекомендации по проектированию микромодулей.

Ключевые слова: микромодуль, технология монтажа, шариковый вывод, гибкая плата, напряженно-деформированное состояние материалов, испытание микромодуля

Сведения об авторах:

Долговых Юрий Геннадьевич; Закрытое акционерное общество «НИИМП-Т», 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд 4806, д.6; wise85@bk.ru;

Поголов Анатолий Иванович, профессор, доктор технических наук; Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, г. Москва, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1; dtm@miee.ru;

Блинов Геннадий Андреевич, профессор, доктор технических наук; Закрытое акционерное общество «НИИМП-Т», 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд 4806, д.6; blinov.38@mail.ru

THE EFFECT OF A LOCAL ABSENCE OF COBALT SILICIDE IN CMOS TECHNOLOGY

The paper discusses the negative physical effect arising from the increasing degree of integration in the host formation of the silicide of cobalt. Shown technology the way to eliminate the negative effect and the results obtained in the route of manufacturing the CMOS 90 nm.

Keywords: Silicide Cobalt, defectivity, Plasma-descum

Data of authors:

Arlin Roman Alexandrovich; Molecular Electronics Research Institute SC, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1-St Zapadny proezd, d. 12/1, e-mail: rarilin@mikron.ru

Kotekina Svetlana Nikolaevna; Molecular Electronics Research Institute SC, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1-St Zapadny proezd, d. 12/1, e-mail: skotekina@mikron.ru

Korotova Irina Alexandrovna; «Mikron», Public Joint-Stock Company, 1-y Zapadny Proezd 12/1, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: ikorotova@mikron.ru

Polyakov Alexandr Nikolaevich; «Mikron», Public Joint-Stock Company, 1-y Zapadny Proezd 12/1, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: apolyakov@mikron.ru

Gorbatov Andrey Alexandrovich; «Mikron» Public Joint-Stock Company, 1-y Zapadny Proezd 12/1, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: agorbatov@mikron.ru

RESEARCH AND DEVELOPMENT TECHNOLOGY FOR CREATING MICROMODULES ON A FLEXIBLE COMMUTATION BOARD

The technology of manufacturing micromodules based of uncased multiconnection large-scale integrated circuits (LSI) with ball conclusions is mounted on a flexible board. Modeling stress-strain state (SSS) materials of the micromodule was carried out and the influence of the size ball conclusions on the strength and durability was investigated. Micromodules were tested. Recommendations for design of micromodules are given.

Keywords: Micromodule, mounting technology, ball conclusion, flexible board, stress-strain state of materials, testing of the micromodule

Data of authors:

Dolgovykh Yuriy Gennadyevich; «NIIMP-T» Closed Joint-Stock Company, 124460, Moscow, Zelenograd, travel 4806, building 6; wise85@bk.ru;

Pogalov Anatoliy Ivanovich, professor, doctor of technical sciences; National Research University «MIET», 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin square, building 1; dtm@miee.ru;

Blinov Gennadiy Andreevich, professor, doctor of technical sciences; «NIIMP-T» Closed Joint-Stock Company, 124460, Moscow, Zelenograd, travel 4806, building 6; blinov.38@mail.ru

К НАУЧНОМУ ПРИБОРОСТРОЕНИЮ ДЛЯ НАНОТЕХНОЛОГИИ: СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Изложены исторические корни зарождения и развития молекулярной нанотехнологии в России, дальнейшее развитие которой потребовало создания специальных приборов – сканирующих зондовых микроскопов. Изложены основные этапы развития сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии нанометрового пространственного разрешения. Приводятся новые конструкции, контроллеры, режимы работы приборов, которые радикально расширяют их аналитические опции; показаны новые разработки микромеханических систем для СЗМ и тенденции их развития.

Ключевые слова: сканирующий туннельный микроскоп, СТМ, сканирующий атомно-силовой микроскоп, АСМ, сканирующий зондовый микроскоп, СЗМ, рамановская спектроскопия, рамановская микроскопия сверхвысокого разрешения, ближнепольная оптическая микроскопия, безапертурная сканирующая зондовая микроскопия ближнего поля, кантилевер, картридж, нанотехнология, метрология, нанометрология

Сведения об авторах:

Быков Виктор Александрович, доктор технических наук, профессор МФТИ, кафедре микроэлектроники ФКЭ МФТИ, Нанотехнологическое общество России, Группа компаний NT-MDT Spectrum Instruments, 124460, Москва, Зеленоград, проезд №4922, дом 4, строение 3, vbykov@ntmdt-si.com

Поляков Вячеслав Викторович, кандидат технических наук, Группа компаний NT-MDT Spectrum Instruments, 124460, Москва, Зеленоград, проезд №4922, дом 4, строение 3, polyakov@ntmdt-si.com

Калинин Арсений Сергеевич, Группа компаний NT-MDT Spectrum Instruments, 124460, Москва, Зеленоград, проезд №4922, дом 4, строение 3, akalinin@ntmdt-si.com

Шелаев Артем Викторович, Группа компаний NT-MDT Spectrum Instruments, 124460, Москва, Зеленоград, проезд №4922, дом 4, строение 3, shelaev@ntmdt-si.com

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ И ТЕРМОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТОВ НА СРЕДНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В АНОДНОМ ОКСИДЕ АЛЮМИНИЯ С НИТЕВИДНЫМИ ПОРАМИ, ЗАПОЛНЕННЫМИ ПОЛИВИНИЛДЕНФТОРИДОМ

Решается задача определения и численного моделирования средних напряжений в композитах типа волокна поливинилиденфторида в матрице анодного оксида алюминия, обусловленных различиями термических коэффициентов линейного расширения элементов неоднородности.

Ключевые слова: анодный оксид алюминия, поливинилиденфторид, матричный композит, термоупругие характеристики, средние напряжения, моделирование

Сведения об авторах:

Красников Геннадий Яковлевич; д. т. н., академик РАН, Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, РФ, Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, дом 12, стр. 1, e-mail: krasnikov@mikron.ru

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

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

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

Яковлев Виктор Борисович, профессор российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Высшая математика №2» МИЭТ, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, yakovlev@miee.ru

SCIENTIFIC INSTRUMENTS FOR NANOTECHNOLOGY: SCANNING PROBE MICROSCOPY

The historical roots of the birth and development of molecular nanotechnology in Russia are outlined, the further development of which required the creation of special instruments - scanning probe microscopes. The main stages of the development of scanning probe microscopy and nanoscale spatial resolution spectroscopy are described. New designs, controllers, modes of operation of devices are presented, which radically expand their analytical options; New developments of micromechanical systems for SPM and trends of their development are shown.

Keywords: scanning tunneling microscopy, STM, scanning atomic force microscopy, AFM, scanning probe microscopy, SPM, Raman spectroscopy, tip enhance Raman Scattering, TERS, SERS, cantilever, cartridge, nanotechnology, metrology, nanometrology.

Data of authors:

Bykov Victor Alexandrovich, doctor of technical science, professor MIPT, Moscow Institute of physics and technology, Nanotechnological society of Russia, NT-Molecular Devices and Tools for Nanotechnology Spectrum Instruments, building 4, building 3, proezd №4922, Zelenograd, Moscow, 124460, vbykov@ntmdt-si.com

Polyakov Vyacheslav Viktorovich, candidate of Sciences, scientific director, NT-Molecular Devices and Tools for Nanotechnology Spectrum Instruments, building 4, building 3, proezd №4922, Zelenograd, Moscow, 124460, polyakov@ntmdt-si.com

Kalinin Arseniy Sergeevich, NT-Molecular Devices and Tools for Nanotechnology Spectrum Instruments, building 4, building 3, proezd №4922, Zelenograd, Moscow, 124460, akalinin@ntmdt-si.com

Shiriaev Artem Viktorovich, NT-Molecular Devices and Tools for Nanotechnology Spectrum Instruments, building 4, building 3, proezd №4922, Zelenograd, Moscow, 124460, shelaev@ntmdt-si.com

EFFECT OF THE STRUCTURE AND THERMOELASTIC CHARACTERISTICS OF COMPONENTS ON THE AVERAGE STRESS IN ANODIC ALUMINUM OXIDE HAVING PORES FILLED WITH POLYVINYLIDENE FLUORIDE

The problem of determining and numerical modelling the average stress in composites with polyvinylidene fluoride fibres in a matrix of anodic aluminum oxide is solved with allowance for the difference between the thermal coefficients of the linear extension of elements of heterogeneity.

Keywords: anodic aluminum oxide, polyvinylidene fluoride, matrix composite, thermoelastic properties, average stress, modelling

Data of authors:

Krasnikov Gennady Yakovlevich, Dr.Sci., RAS academician, Molecular Electronic Research Institute, Stock Company 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, gkrasnikov@mikron.ru

Barдушкин Владимир Валентинович, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, docent, Professor departments of "Higher mathematics No. 2" and "System environment" quality MIET, «National Research University of Electronic Technology», Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, bardushkin@mail.ru;

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

Shilyeva Yuliya Igorevna, Candidate of Chemical Sciences, «National Research University of Electronic Technology», Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, shilyeva@gmail.com;

Yakovlev Viktor Borisovich, Professor of Russian Academy of Sciences, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor of "Higher mathematics No. 2" MIET, «National Research University of Electronic Technology», Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, yakovlev@miee.ru

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ Si-SiO₂ С НАНОТОНКИМИ СЛОЯМИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Проведено исследование некоторых оптических и электрофизических характеристик (показатель преломления, критическое поле пробоя, вольт-фарадные характеристики) структур Si-SiO₂ с нанотонкими слоями диоксида кремния. Показано, что в диапазоне 3–11 нм эти параметры существенно зависят от толщины SiO₂. С уменьшением толщины диоксида наблюдается увеличение показателя преломления примерно на 5% и критического поля пробоя примерно на 25%, а также сдвиг ВФХ в сторону положительных напряжений вплоть до перехода напряжения плоских зон через нуль. Наиболее резкое изменение n и $E_{кр}$ а также переход через нуль $E_{р}$ имеют место в области толщин 6,0–7,5 нм. Объяснение наблюдаемых явлений предложено в рамках адсорбционной модели.

Ключевые слова: МДП-структура, диоксид кремния, субтонкие слои, электрофизические свойства, оптические свойства

Сведения об авторах:

Зайцев Николай Алексеевич, доктор технических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, nzaytsev@mikron.ru

Красников Геннадий Яковлевич; д. т. н., академик РАН, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, РФ, Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный проезд, дом 12, стр. 1, e-mail: krasnikov@mikron.ru

Плотников Юрий Иванович, кан-дидат технических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, Зеленоград, 1-ый Западный проезд, д.12, стр. 1, yplotnikov@mail.ru

ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ ВЕТВЯЩИХСЯ МОЛЕКУЛ ТРАНС-ПОЛИАЦЕТИЛЕНА

С помощью *ab initio* моделирования методом функционала плотности исследовано изменение геометрии и энергетического спектра Y-разветвителя на основе молекулярных цепочек транс-полиацетилена при инжекции носителей заряда. Показано, что заряд локализуется в точке ветвления. Взаимодействие локализованных электронов и фононов приводит к понижению подвижности электронов проводимости.

Ключевые слова: транс-полиацетилен, Y-разветвитель, квантовый транспорт, теория Маркуса, локализованные состояния

Сведения об авторах:

Журавлев Максим Николаевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, 124498, maxim@org.miet.ru

Катаева Татьяна Сергеевна, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, 124498, tatyana.kataeva@gmail.com

PHYSICO-TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE SYSTEM FORMATION Si-SiO₂ WITH NANOTHIN LAYERS OF SILICON DIOXIDE

The study tested some optical and electrophysical characteristics (index of refraction, the critical field of breakdown, characteristic volt-faradnye) structures of Si-SiO₂ with nanothin layers of dioxide of silicon. The study shows that in the range the 3-11th these parameters significantly depend on SiO₂ thickness. With reduction of thickness of dioxide increase in index of refraction ~ for 5% and the critical field of breakdown ~ for 25%, and also shift of VFH towards positive tension is observed up to transition of tension of flat zones through zero. The sharpest change of n and $E_{кр}$ and also transition through zero $E_{р}$ take place in the field of thickness of 6,0–7,5 nm. The explanation of the observed phenomena is offered within the adsorptive model.

Keywords: MDP-structure, silicon dioxide, subthin layers, electrophysical properties, optical properties

Data of authors:

Zaytsev Nikolay Alekseevich, Doctor of Science, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1-st Zapadny proezd, 12/1, nzaytsev@mikron.ru

Krasnikov Gennady Yakovlevich, Dr.Sci., RAS academician, Molecular Electronic Research Institute, Stock Company 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1-st Zapadny proezd, 12/1, gkrasnikov@mikron.ru

Plotnikov Yuri Ivanovich, candidate of Sciences, "Molecular Electronics Research Institute" Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1-st Zapadny proezd, 12/1, yplotnikov@mikron.ru

TRANSPORT PROPERTIES OF ORGANIC SEMICONDUCTORS BASED ON BRANCHED MOLECULES OF TRANS-POLYACETHYLENE

Modifications of geometry and energy spectrum at charge carries injection in the Y-splitter based on trans-polyacetylene molecular chains are researched by *ab initio* simulations using the density functional method. It is shown that the charge is localized at the branch point. The interaction of localized electrons and phonons leads to decrease in the mobility of conduction electrons.

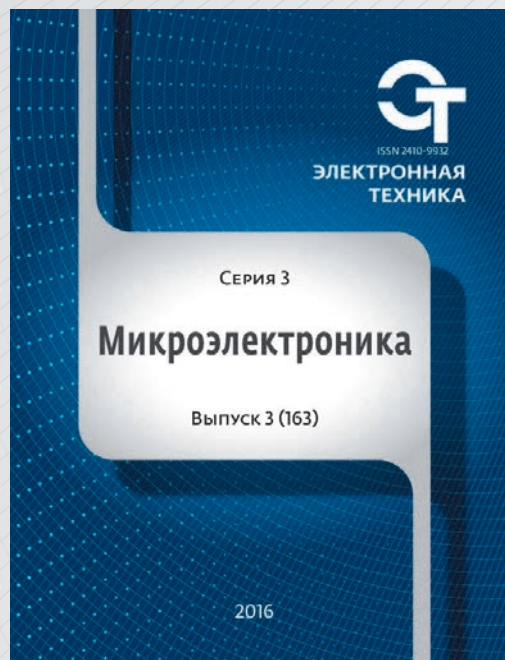
Keywords: : trans-polyacetylene, Y-splitter, quantum transport, Marcus theory, localized states

Data of authors:

Zhuravlev Maxim Nikolaevich, candidate of physico-mathematical Sciences, National Research University of Electronic Technology "MIET", Russia, Zelenograd, bld. 1, Shokin Square, 124498, maxim@org.miet.ru

Kataeva Tatyana Sergeevna, National Research University of Electronic Technology "MIET", Russia, Zelenograd, bld. 1, Shokin Square, 124498, tatyana.kataeva@gmail.com

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ "ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. СЕРИЯ 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА" НА 2017 ГОД!



Журнал издается 4 раза в год с 1965 года, возобновлено в 2014 г.

Лицензия Роскомнадзора:
ПИ № ФС77-55092 от 14.08.2013 г.

Учредитель: АО "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники"

Главный редактор журнала:
д. т. н., академик РАН, Г. Я. Красников

Журнал включен Всероссийской аттестационной комиссией (ВАК) в число изданий, рекомендованных для публикации статей соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук №1969 в перечне от 26.06.2017г.
ISSN 2410-9932

- Журнал рассчитан на широкий круг специалистов, разрабатывающих и изготавливающих изделия микро- и наноэлектроники.
- Журнал комплексно освещает современные достижения и проблемы микро- и наноэлектроники во всех сферах научной и производственной деятельности от технологии до экономики.
- Журнал открыт как для отечественных, так и для зарубежных авторов.

Для удобства читателей и подписчиков мы постарались учесть все возможные способы подписки, среди которых можно выбрать наиболее удобный. Мы предлагаем:

Оформить подписку на печатные версии журналов через Почту России и альтернативные агентства

Подписной индекс 80408 в каталоге ОАО Агентство "Роспечать".

Оформить подписку на электронные версии журналов или приобрести отдельные выпуски журналов и статей в электронном виде

путем покупки прав пользования электронной версией журнала или статьей на сайте <http://elibrary.ru/defaultx.asp>.

Оформить подписку непосредственно в редакции

- для юридических лиц по гарантийному письму за подписью руководителя и главного бухгалтера с указанием реквизитов предприятия (Скан письма можно направить на электронный адрес: journal_EEM-3@mikron.ru, а оригинал по почте: 124460 г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, дом 12, строение 1),
- для физических лиц по заявке, направленной на электронный адрес редакции: journal_EEM-3@mikron.ru.

По всем вопросам подписки и приобретения журналов обращайтесь в редакцию

☎ +7 495 229-70-43 ✉ journal_EEM-3@mikron.ru