



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 2 (170) 2018

ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Issue 2 (170) 2018

Москва, 2018



"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"

Слово редактора 4

Физические явления

Г. Я. Красников, Е. С. Горнев, П. В. Игнатов, Д. С. Мизгинов
Анализ моделей пробоя подзатворного диэлектрика 5–7

Разработка и конструирование

М. А. Королев, А. Ю. Красюков, Т. Ю. Крупкина, Ю. А. Чаплыгин
3D двухзатворный беспереходной МОП-транзистор 8–16

Процессы и технология

Г. Я. Красников, Е. С. Горнев, П. В. Игнатов, Д. С. Мизгинов
Обзор методов подавления короткоканальных эффектов
в глубокосубмикронном МОП-транзисторе 17–19

А. Н. Палагушкин, Ф. А. Юдкин, С. А. Прокопенко, А. П. Сергеев
Технология мемристоров 20–26

В. В. Побединский, Н. В. Рогозин, Е. В. Лаврентьев, А. В. Рябов,
В. В. Зенин, Е. Н. Бормонтов
Платиновые стад-бампы с припойными шариками на
алюминиевой металлизации кремниевых кристаллов
в технологии flip-chip 27–31

Технологическое и измерительное оборудование

Е. Л. Харченко, А. В. Кузовков, В. В. Иванов
Метод оптимизации источника освещения в проекционной
фотолитографии 32–37

Свойства материалов

Г. Я. Красников, Е. С. Горнев, С. Н. Орлов, Р. К. Яфаров,
А. Р. Яфаров, С. П. Тимошенко, В. П. Тимошенко
Полевая эмиссия электронов многоострийных кремниевых
катодных матриц 38–42

Математическое моделирование

Е. М. Бакулин, Г. В. Курушин, К. А. Строганов
Результаты моделирования конструкции микроакселерометра
на основе интегрированной технологии микромеханики
и акустоэлектроники 43–49

С. В. Забодаев, С. В. Селищев
Способ оценки латентности передачи данных в системах
регистрации биопотенциалов головного мозга 50–55

Квантовые компьютеры

В. В. Аристов, А. В. Никулов
О причинах сомнений в реальности квантового компьютера 56–71

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

Editor's Column 4

Physical Phenomena

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

Analysis of gate oxide breakdown models..... 5–7

Development and Designing;

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

3D double-gate junctionless MOSFET 8–16

Processes and Technology

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

A review of methods for suppression of short-channel effects in
deep submicron MOS transistor..... 17–19

A. N. Palagushkin, F. A. Yudkin, S. A. Prokopenko, A. P. Sergeev

Technology of memristors 20–26

V. V. Pobedinsky, N. V. Rogozin, E. V. Lavrentev, A. V. Ryabov,

V. V. Zenin, E. N. Bormontov

Platinum stud-bumps with solder balls on aluminum metallization
of silicon die in flip-chip technology 27–31

Processing And Measuring Equipment

E. L. Kharchenko, A. V. Kuzovkov, V. V. Ivanov

Illumination source optimization method in projection
photolithography 32–37

Properties of Materials

G. Ya Krasnikov, E. S. Gornev, S. N. Orlov, R. K. Yafarov,

A. R. Yafarov, S. P. Timoshenkov, V. P. Timoshenkov

Field emission of electrons of multi-tip cathode matrices on p-type
silicon crystals..... 38–42

Mathematical Simulation

E. M. Bakulin, G. V. Kurushin, K. A. Stroganov

Results of simulation of the microaccelerometer design based on
integrated technology of micromechanics and acoustoelectronics 43–49

S. V. Zabodaev, S. V. Selishchev

Method of evaluation of data stream latency in brain biopotentials
acquisition systems 50–55

V. V. Aristov, A. V. Nikulov

The reasons for doubts about the reality of quantum computer 56–71

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

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Вашему вниманию предлагается очередной, 15-й, выпуск научно-технического издания «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника».

В данном номере журнала представлены десять оригинальных статей. Статьи очень разные. Они описывают актуальность исследований, цели и задачи научных изысканий, а также суть новаторства изложенных идей.

Редакционная коллегия, оперативно реагируя на научную ситуацию в электронике, допускает различные вариации тематических разделов журнала.

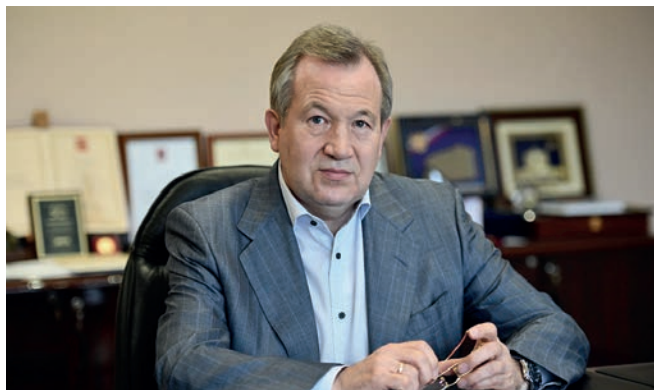
Выпуск представлен семью разделами. В блоке «Физические явления» рассматриваются модели пробоя подзатворного диэлектрика, а также описываются условия их применимости.

В разделе «Разработка и конструирование» проведено моделирование трехмерного двухзатворного варианта прибора с применением пакета Sentaurus TCAD.

В следующем блоке «Процессы и технология» были рассмотрены конструктивно-технологические методы подавления короткоканальных эффектов в глубокосубмикронном МОП-транзисторе. Также исследованы возможные причины нестабильности параметров мемристорных наноструктур, вызванные технологией изготовления. Кроме того, изучены технологические особенности формирования платиновых стад-бампов термовуговой микросваркой на кремниевых кристаллах с алюминиевой металлизацией контактных площадок.

Раздел «Технологическое и измерительное оборудование» представлен обзором алгоритмов решения оптимизации геометрии источника освещения.

В блоке «Свойства материалов» исследовано влияние плазмохимической модификации поверхности на автоэмиссионные свойства кристаллов кремния дырочного типа проводимости.



Раздел «Математическое моделирование» представлен результатами моделирования конструкции чувствительного элемента микроакселерометра в части размеров инерционной массы и гибкого подвеса с ПАВ-топологией. Также рассматривается структурная схема передачи данных между устройством для регистрации биологических сигналов и электронно-вычислительной машиной.

Заключительный блок «Квантовые компьютеры» представлен обзором причин сомнений в реальности квантового компьютера.

Отдельно хотелось бы отметить, что 8 июня 2018 года состоялось собрание Редакционного совета журнала. По результатам обсуждения был рассмотрен план мероприятий по индексированию издания в международных наукометрических базах данных Scopus и Web of Science.

Редакция искренне надеется, что предлагаемые Вашему вниманию публикации окажутся полезными для широкого круга читателей, не безразличных к современным достижениям и проблемам микро- и нанoeлектроники во всех сферах научной и производственной деятельности от технологии до экономики.

*С уважением,
главный редактор журнала,
д.т.н., профессор, академик РАН*

Г. Я. Красников

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРОБОЯ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

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

В данной статье рассматриваются модели пробоя подзатворного диэлектрика. Рассмотрены такие модели, как термохимическая модель, модель инжекции дырок из анода, модель выхода водорода и комплементарная модель. А также описаны условия их применимости.

ANALYSIS OF GATE OXIDE BREAKDOWN MODELS

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

MERIS SC

In this article models of gate oxide breakdown are considered. Such models as hydrogen release model, thermochemical model, anode hole injection model and complementary model are considered. Conditions for the applicability are also described.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, с масштабированием КМОП-микросхем уменьшается толщина подзатворного диэлектрика МДП-структур. В связи с этим, пробой подзатворного диэлектрика становится одной из главных причин выхода из строя интегральных микросхем. Изучение механизмов пробоя диэлектрика является важнейшей задачей при проектировании интегральных микросхем [1]. В настоящее время не существует универсальной модели, которая с точностью позволяла бы определить время пробоя диэлектрика вне зависимости от величины внешнего электрического поля. Тем не менее существуют модели, которые с высокой точностью согласуются с эмпирическими данными. В данной статье представлены такие модели пробоя подзатворного диэлектрика, как термохимическая модель, модель инжекции дырок из анода, модель выхода водорода и комплементарная модель. В качестве подзатворного диэлектрика рассматривается диоксид кремния.

Наиболее широко используемыми моделями для описания механизма пробоя диэлектрика являются термохимическая модель (E-модель) и модель инжекции дырок из анода (1/E-модель) [2]. В слабых электрических полях (<10 МВ/см) термохимическая модель хорошо согласуется с экспериментальными данными, а в сильных (>10 МВ/см) – лучшую согласованность с экспериментальными данными показывает модель инжекции дырок из анода.

ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В термохимической модели утверждается, что повреждение структуры диэлектрика вызывает электрическое поле, а не ток, в отличие от модели инжекции дырок из анода. Первичной структурной единицей аморфного диоксида кремния является тетраэдр SiO_4 (рис. 1).

Каждый ион кремния соединен с четырьмя ионами кислорода, которые расположены в форме тетраэдра. Угол связи O-Si-O составляет 109° , а угол между соединениями, связывающими тетраэдры, колеблется в пределах $120\text{--}180^\circ$. Если в результате воздействия электрического поля этот угол становится больше 150° , прочность соединения значительно ослабевает и возникает кислородная вакансия (рис. 2), которая считается дефектом.

Связи Si-Si сильно напряжены из-за большого локального электрического поля [3]. Эти связи могут время от времени получать достаточное количество тепловой энергии, что приводит к их разрыву, при котором создаются дырочные ловушки. Генерация большого количества таких дефектов приводит к пробую.

Данная модель применима в электрических полях менее 10 МВ/см. К недостатку модели можно отнести то, что она не объясняет зависимости времени пробоя от смены полярности приложенного напряжения.

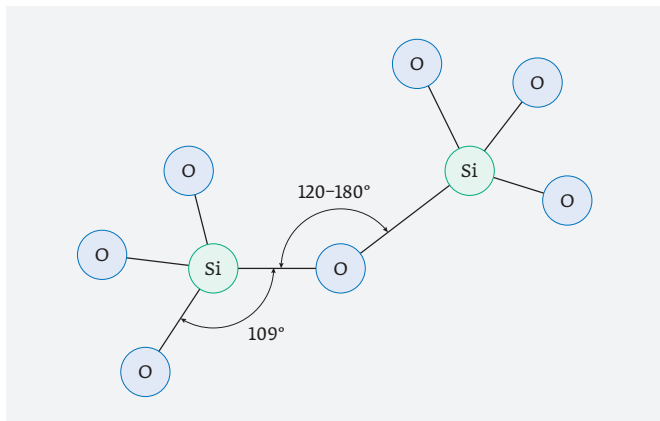


Рис. 1. Химическая структура SiO_2

МОДЕЛЬ ИНЖЕКЦИИ ДЫРОК ИЗ АНОДА

В модели инжекции дырок из анода предполагается, что повреждения структуры происходят из-за тока, проходящего через диэлектрик. Этот ток вызван туннелированием Фаулера – Нордгейма. Электроны, туннелировавшие с катода в зону проводимости SiO_2 , движутся по направлению к аноду. При этом они повреждают структуру диэлектрика посредством ударной ионизации. Электроны с высокой кинетической энергией достигают анода и переносят энергию на электрон, находящийся на аноде в валентной зоне. Электрон из валентной зоны переходит на край зоны проводимости, при этом в валентной зоне образуется дырка с высокой кинетической энергией, которая туннелирует в оксид. Эти дырки также вызывают повреждения структуры диэлектрика (рис. 3). Таким образом, возникает взаимная обратная связь, которая приводит к пробое диэлектрика.

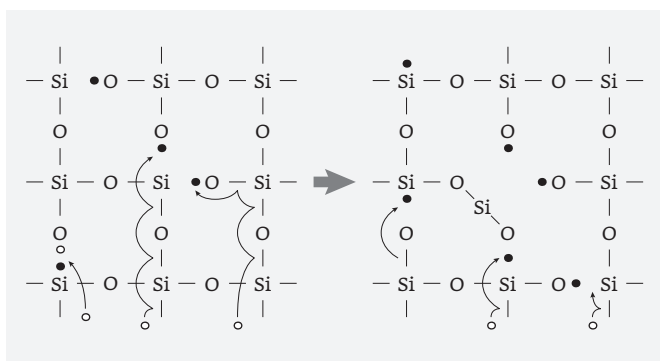


Рис. 3. Возникновение дефектов в диэлектрике в результате воздействия электрического тока

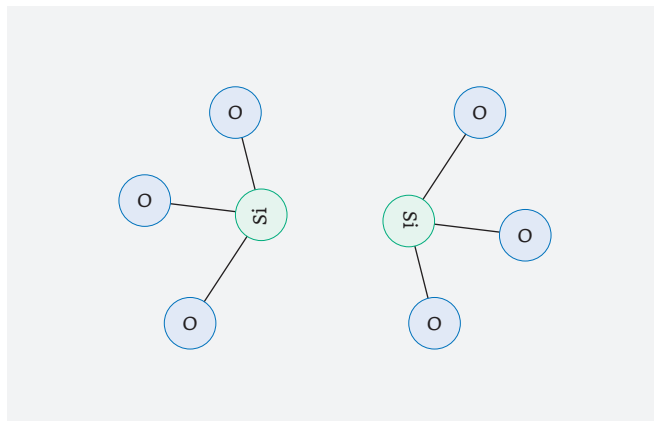


Рис. 2. Кислородная вакансия в SiO_2

Модель применима в электрических полях более 10 МВ/см. Недостатком модели является то, что она не может объяснить сильную температурную зависимость времени пробоя.

МОДЕЛЬ ВЫХОДА ВОДОРОДА

Модель выхода водорода [2] похожа на модель инжекции дырок из анода, с тем отличием, что вместо дырок на аноде генерируются протоны (H^+), после чего попадают в оксид. Электроны с высокой кинетической энергией туннелируют через оксид и разрывают связи Si-H на аноде. Таким образом, ион водорода H^+ попадает в оксид, а на аноде остается обособленная кремниевая связь (рис. 4). Как только протон попал в оксид, он реагирует с кислородной вакансией (Si-Si) и создает ловушку: $(\text{Si-Si}) + \text{H}^+ \rightarrow \text{Si-H}^+-\text{Si}$. В результате роста числа ловушек происходит пробой.

Модель выхода водорода наилучшим образом подходит для тонких диэлектрических пленок, с толщиной менее 40 ангстрем. Основные

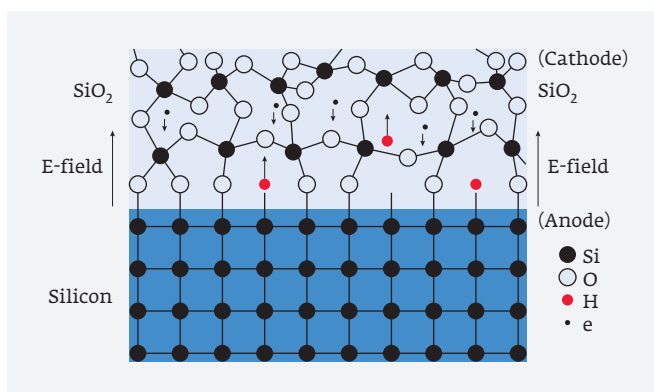


Рис. 4. Граница раздела Si-SiO_2

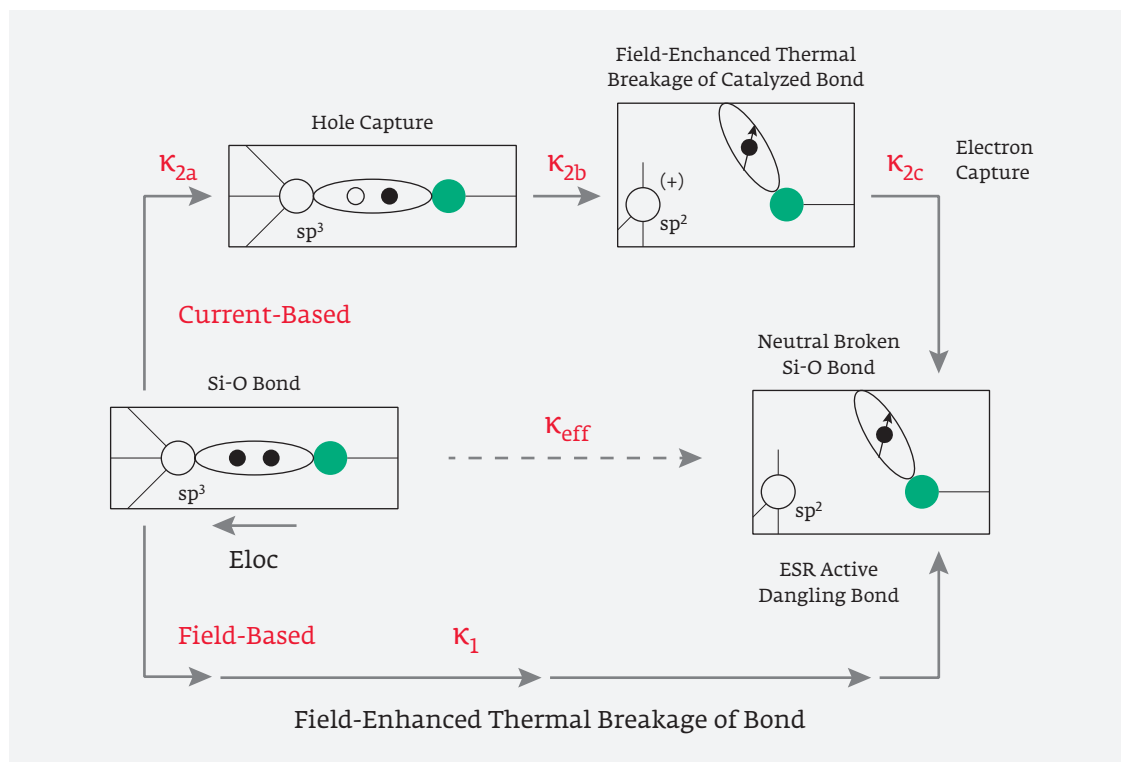


Рис. 5. Схема разрыва связи Si–O в комплементарной модели

недостатки модели заключаются в том, что она не может объяснить сильную температурную зависимость времени пробоя, а также зависимость энергии активации от величины приложенного поля.

КОМПЛЕМЕНТАРНАЯ МОДЕЛЬ

Комплементарная модель является объединением термохимической модели и модели инжекции дырок из анода [4]. Данная модель объясняет механизм деградации подзатворного диэлектрика как одновременное влияние электрического поля и тока.

Разрыв связей Si–O происходит одновременно по двум реакционным путям (рис. 5). Первый реакционный путь (k_1) соответствует тепловому разрыву связи за счет действия электрического поля. Второй реакционный путь (k_2) состоит из трех составляющих. Во-первых, это захват дырки связью Si–O и тем самым уменьшение энергии активации приблизительно в два раза. Во-вторых, это тепловой разрыв связи за счет действия поля. И, в-третьих, это захват электрона оборванной связью со стороны атома кремния. Поскольку разрыв связей Si–O происходит как по одному, так и по другому реакционному пути, эффективная константа скорости реакции k_{eff} является суммой k_1 и k_2 .

Также при расчете времени пробоя подзатворного диэлектрика необходимо учитывать такие факторы, как влияние горячих носителей в канале, воздействие ионизирующего излучения и дефектность при производстве.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Doering R., Nishi Y.** Handbook of semiconductor manufacturing technology. – CRC Press, 2008. 1483 p.
2. **McPherson J. W.** Time dependent dielectric breakdown physics – Models revisited // Microelectronics Reliability. 2012. Vol. 52. Is. 9–10. PP. 1753–1760.
3. **McPherson J. W., Mogul H. C.** Underlying physics of the thermochemical E model in describing low-field time-dependent dielectric breakdown in SiO₂ thin films // Journal of Applied Physics. 1998. Vol. 84. Is. 3. PP. 1513–1523.
4. **McPherson J. W., Khamankar R. B., Shanware A.** Complementary model for intrinsic time-dependent dielectric breakdown in SiO₂ dielectrics // Journal of Applied Physics. 2000. Vol. 88. Is. 9. PP. 5351–5359.

3D ДВУХЗАТВОРНЫЙ БЕСПЕРЕХОДНОЙ МОП-ТРАНЗИСТОР

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

С целью улучшения параметров планарного беспереходного МОП-транзистора проведено моделирование трехмерного двухзатворного варианта прибора с применением пакета Sentaurus TCAD. Показано, что 3D беспереходной МОП-транзистор при технологических нормах 90 нм имеет подпороговый ток – $3 \cdot 10^{-13}$ А/мкм и подпороговый наклон – 82 мВ/дек, что превосходит параметры традиционных МОП-транзисторов при сопоставимой величине тока насыщения 320 мкА/мкм.

3D DOUBLE-GATE JUNCTIONLESS MOSFET

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

Double-gate junctionless transistors were analyzed using Sentaurus TCAD simulation package. It was shown that 3D double-gate junctionless MOSFET with 90 nm design rules has very low leakage current – $3 \cdot 10^{-13}$ A/um and subthreshold slope – 82 mV/dec with saturation current at about 320 uA/um. Such characteristics of simulated junctionless transistor are better than conventional inversion-mode transistor parameters.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, основная тенденция развития микроэлектроники – постоянное увеличение степени интеграции микросхем (закон Мура) путем уменьшения размеров элементов – сдерживается возникновением короткоканальных эффектов в МОП-транзисторе, в первую очередь обусловленных распространением ОПЗ стокового р-п-перехода в область канала прибора. С этой точки зрения несомненный интерес представляет новый полупроводниковый прибор, разработанный в 2010 году группой ученых под руководством Жан-Пьер Коленжа из Ирландского национального института Тиндалла, который был назван беспереходным (junctionless) МОП-транзистором (БПТ) [1–3]. На рис. 1 представлена структура такого прибора сравнительно со структурой обычного МОП-транзистора.

Как следует из приводимой структуры в приборе нет р-п-переходов, соответственно, отсутствуют ОПЗ, приводящие к возникновению короткоканальных эффектов, ограничивающих возможность уменьшения размеров транзистора. По существу такой прибор представляет собой управляемый полевым эффектом кремниевый пленочный рези-

стор. Достоинством прибора является и простота его конструкции, что существенно упрощает технологический процесс изготовления транзистора и снижает его стоимость.

Разработчики БПТ, а также их последователи в основном исследовали МОП-транзисторы на основе нанопроволоки диаметром порядка 20 нм, что приводило к необходимости использовать кремний с высокой концентрацией примеси (10^{19} см⁻³). При этом из-за сильного электрического поля в области перехода сток-канал

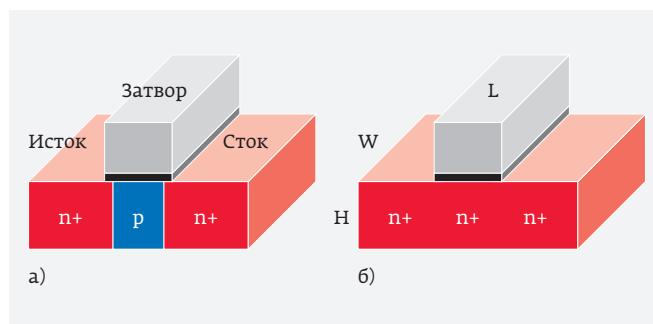


Рис. 1. Сравнение структур обычного (а) и беспереходного (б) МОП-транзисторов

в закрытом состоянии прибора возникало межзонное туннелирование с образованием электрон-дырочных пар, приводящее к росту подпороговых токов, что существенно ухудшало электрические параметры прибора. Попытки решить эту проблему конструктивными методами сохраняя при этом высокую концентрацию примеси в полупроводнике и нанопроволоку в качестве основы прибора существенно усложняли как структуру транзистора, так и технологический процесс его формирования [4–5].

Для решения проблемы высоких подпороговых токов МОП БПТ авторами работы [6] было предложено использовать планарную конструкцию прибора и снизить концентрацию примеси в пленке кремния до уровня, при котором не возникает межзонное туннелирование, приводящее к увеличению тока стока в закрытом состоянии. Конструктивной особенностью такого прибора является необходимость создания на краях рабочего тела прибора дополнительных сильнолегированных контактных областей к стоку и истоку.

Анализ характеристик такого планарного МОП БПТ, спроектированного с учетом параметров технологического процесса с нормой 90 нм, показал, что при концентрации примеси в пленке кремния $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ подпороговые токи имеют значение 10^{-13} А/мкм , что существенно ниже, чем у нанопроволочных МОП БПТ и инверсионных МОП-транзисторов при сопоставимой величине тока насыщения.

Однако у такого конструктивного варианта МОП БПТ имеются недостатки:

- планарная структура прибора занимает достаточно большую площадь, что снижает возможность увеличения степени интеграции микросхемы;
- предлагаемый авторами работы [6] уровень легирования пленки кремния ($6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$), во-первых, недостаточен для предотвращения возникновения инверсного канала при термическом окислении кремния р-типа и, во-вторых, не обеспечивает высокую проводимость объемного канала БПТ. Повышение концентрации примеси в пленке кремния при планарной конструкции прибора приведет к уходу величины порогового напряжения из диапазона допустимых значений для технологии 90 нм. Для компенсации такого изменения порогового напряжения транзистора необходимо уменьшить толщину пленки кремния в КНИ-структуре, что соз-

дает определенные проблемы технологического и экономического характера.

В излагаемом в данной статье материале приведены результаты исследований, посвященных устранению перечисленных недостатков планарного МОП БПТ путем использования трехмерной (3D) двухзатворной структуры прибора типа FinFET.

3D ДВУХЗАТВОРНЫЙ БЕСПЕРЕХОДНОЙ МОПТ

В последние годы большую популярность приобрели 3D двухзатворные МОП-транзисторы [7–9] (рис. 2). В таких приборах удалось вдвое увеличить рабочий ток транзистора. Одним из примеров транзистора с двойным затвором является конструкция FinFET-транзистора (Fin Field Effect Transistor). Своё название он получил из-за того, что в этом приборе с трехмерной структурой тонкое кремниевое тело (подложка) имеет форму плавника (fin) и обернуто с боков электродом затвора, изолированного от полупроводника пленкой подзатворного диэлектрика.

Последовательность формирования трехмерных МОП-транзисторов на КНИ-подложке показана на рис. 3. Толщина верхнего слоя кремния опре-

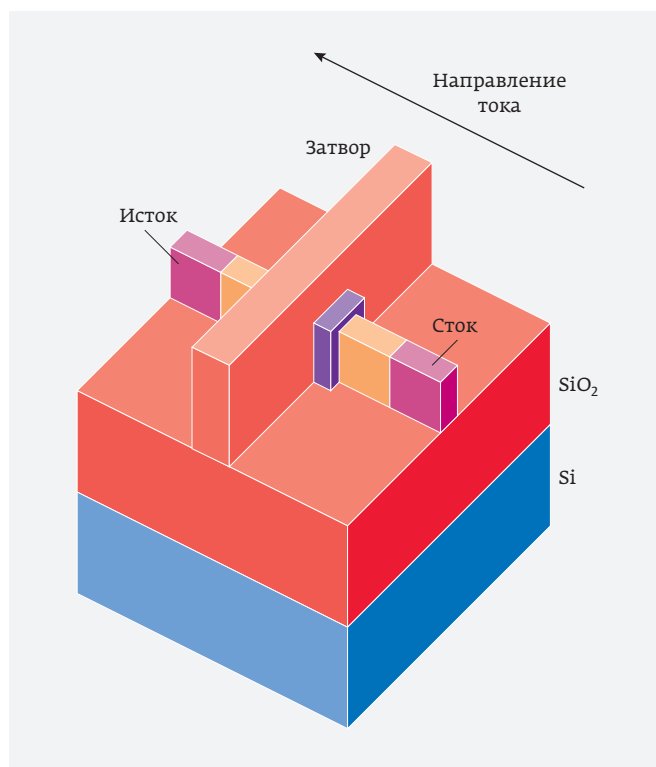


Рис. 2. 3D МОП-транзистор

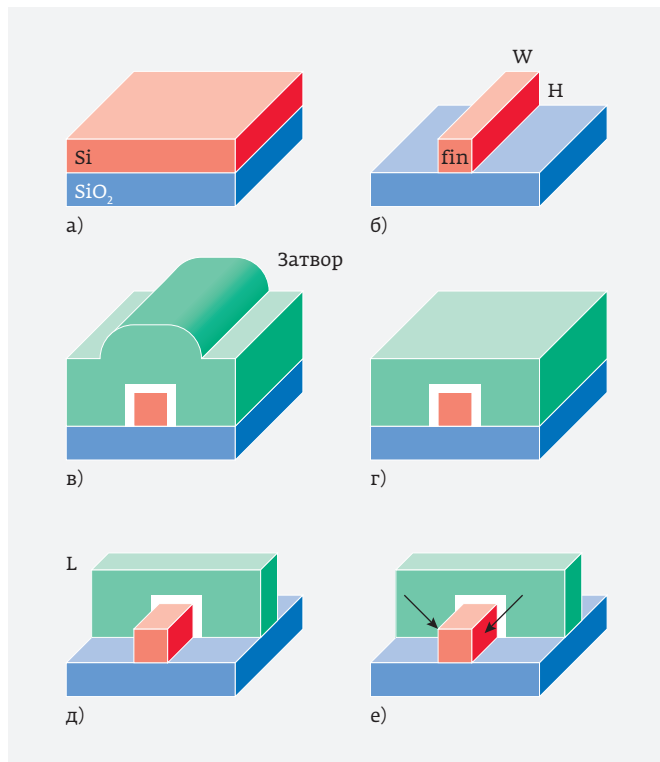


Рис. 3. Основные этапы формирования трехмерного двухзатворного МОП-транзистора: а – исходная КНИ-структура; б – формирование плавника; в – окисление кремния и осаждение поликремния; г – планаризация; д – формирование затвора; е – формирование стока/истока или контактов БПТ

деляет высоту плавника (H). Критичный размер ширины плавника (W) определяется возможностями оптической литографии и процесса реактивного ионного травления (РИТ) кремния с использованием в качестве двухслойной твердой маски сочетания оксид/нитрид кремния при формировании тела плавника. После создания плавника с помощью РИТ боковые стенки его поверхности имеют высокую плотность кристаллографических дефектов. Для их удаления применяется термическое окисление боковых стенок плавника с последующим удалением выросшего оксида кремния. Далее выращивается подзатворный диэлектрик и осаждается поликремний, легированный соответствующей примесью для подгонки порогового напряжения МОП-транзистора. Затем следует операция химико-механической планаризации для выравнивания поверхности осажденного поликремния, что облегчает процессы фотолитографии и травления при формировании электрода затвора. Области истока и стока, а в случае БПТ –

контакты к ним, формируются после структурирования электрода затвора с использованием ионной имплантации примеси под углом к боковой стенке плавника.

Одним из конструктивных вариантов такого прибора является транзистор, у которого электроды затвора расположены лишь с двух сторон рабочего тела-плавника. Вертикальное расположение транзистора существенно сокращает площадь, занимаемую прибором, и позволяет, соответственно, повысить степень интеграции микросхемы. Однако следует отметить, что тело транзистора формируется с помощью РИТ, при котором возникают дефекты на боковых стенках плавника, и их устранение является серьезной технологической задачей. Термическое окисление боковых стенок плавника с последующим удалением выросшего оксида кремния, которое обычно применяется, не позволяет снизить поверхностные дефекты до необходимого для высококачественного МОП-транзистора уровня.

В данной статье приведены результаты математического моделирования беспереходного МОП-транзистора с концентрацией примеси в теле прибора, обеспечивающей низкие подпороговые токи и имеющего двухзатворную трехмерную конструкцию. Целесообразность использования такой структуры для МОП БПТ можно объяснить следующими факторами:

- уменьшается площадь, занимаемая вертикальным транзистором по сравнению с планарным;
- при двухзатворной конструкции уменьшается в два раза эффективная толщина рабочего тела, что позволяет повысить концентрацию примеси в нем с сохранением величины порогового напряжения;
- так как рабочее тело транзистора создается путем РИТ поверхностного слоя кремниевой пластины, то нет необходимости использовать дорогостоящие КНИ-подложки;
- у МОП БПТ – объемный канал, ограниченный ОПЗ МОП-структур затворов, что снижает требование к кристаллическому совершенству боковых стенок плавника и позволяет увеличить высоту рабочего тела путем повышения длительности РИТ. Даже при работе в режиме обогащения основная проводимость прибора в открытом состоянии определяется объемным каналом транзистора;
- вследствие низкой концентрации примеси в объемном канале подвижность носите-

лей в нем существенно выше, чем в поверхностном инверсионном.

МОДЕЛИРОВАНИЕ 3Д БПТ

При создании структурной модели БПТ для математического моделирования были использованы конструктивно-технологические параметры процесса, принятые при формировании инверсионных КМОП ИС с технологической нормой 90 нм и примененные в традиционном маршруте формирования FinFET. Расчет проходных ВАХ при низком и высоком напряжениях сток-исток $V_{си} = 0,1$ и $1,2$ В, соответственно, проводился с использованием пакета Sentaurus TCAD [10–12]. В расчете использованы следующие модели:

- гидродинамическая модель для электронов;
- модель квантования энергии носителей в канале (DensityGradient);
- модель межзонной генерации (Band2Band);

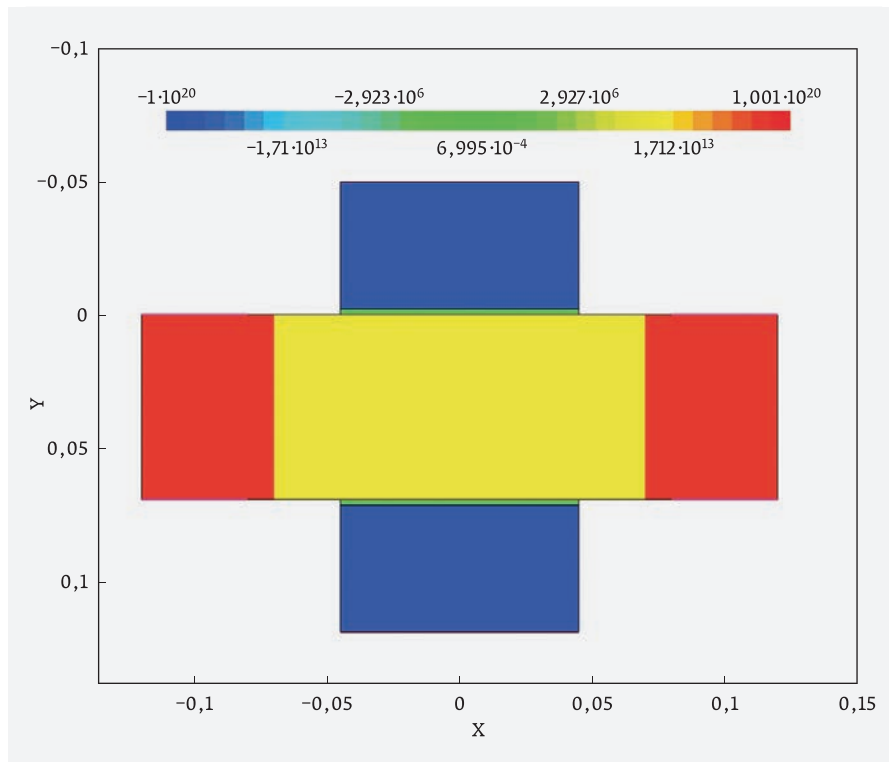


Рис. 4. Двухмерная модель двухзатворного БПТ

- заряд границы Si-SiO₂, $N_{ss} = 10^{11} \text{ см}^{-2}$.
Определялись следующие электрические параметры каждого транзистора:
- пороговое напряжение при $V_{си} = 0,1$ и $1,2$ В, определяемое при $I_c = 0,1$ мкА/мкм;

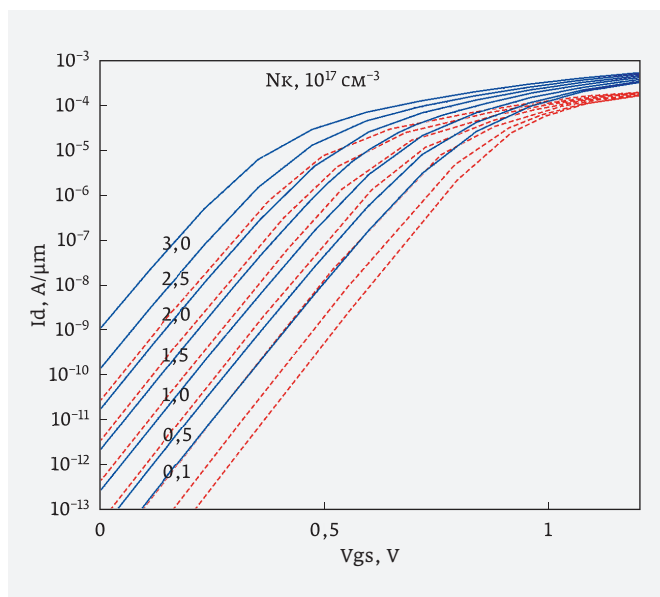


Рис. 5. Проходные ВАХ двухзатворного БПТ при разной концентрации примеси в канале N_k (сплошные линии – $V_{си} = 1,2$ В, пунктир – $V_{си} = 0,1$ В)

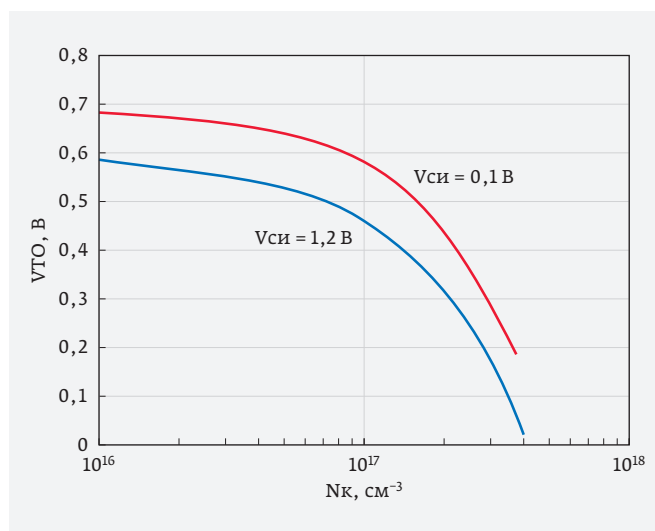


Рис. 6. Расчетные зависимости порогового напряжения от концентрации примеси в кремнии для $V_{си} = 0,1$ и $1,2$ В

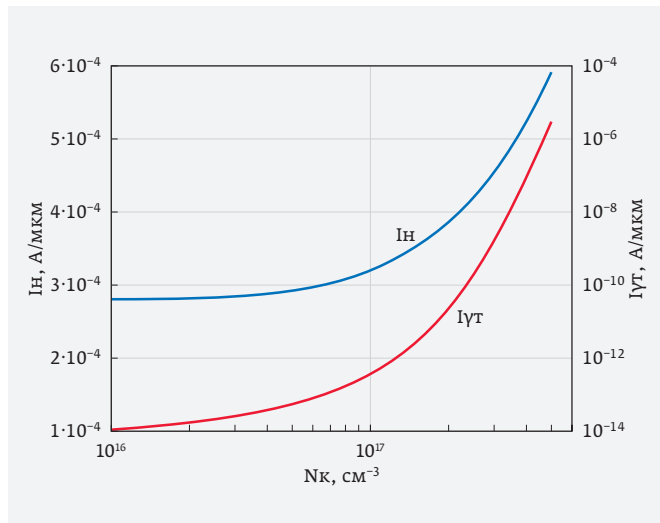


Рис. 7. Расчетные зависимости тока насыщения и утечки от концентрации примеси в кремнии

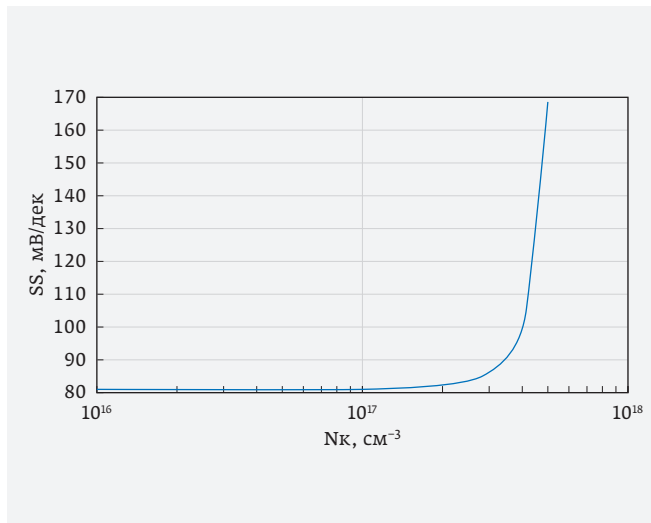


Рис. 8. Расчетные зависимости величины подпорогового наклона от концентрации примеси в кремнии

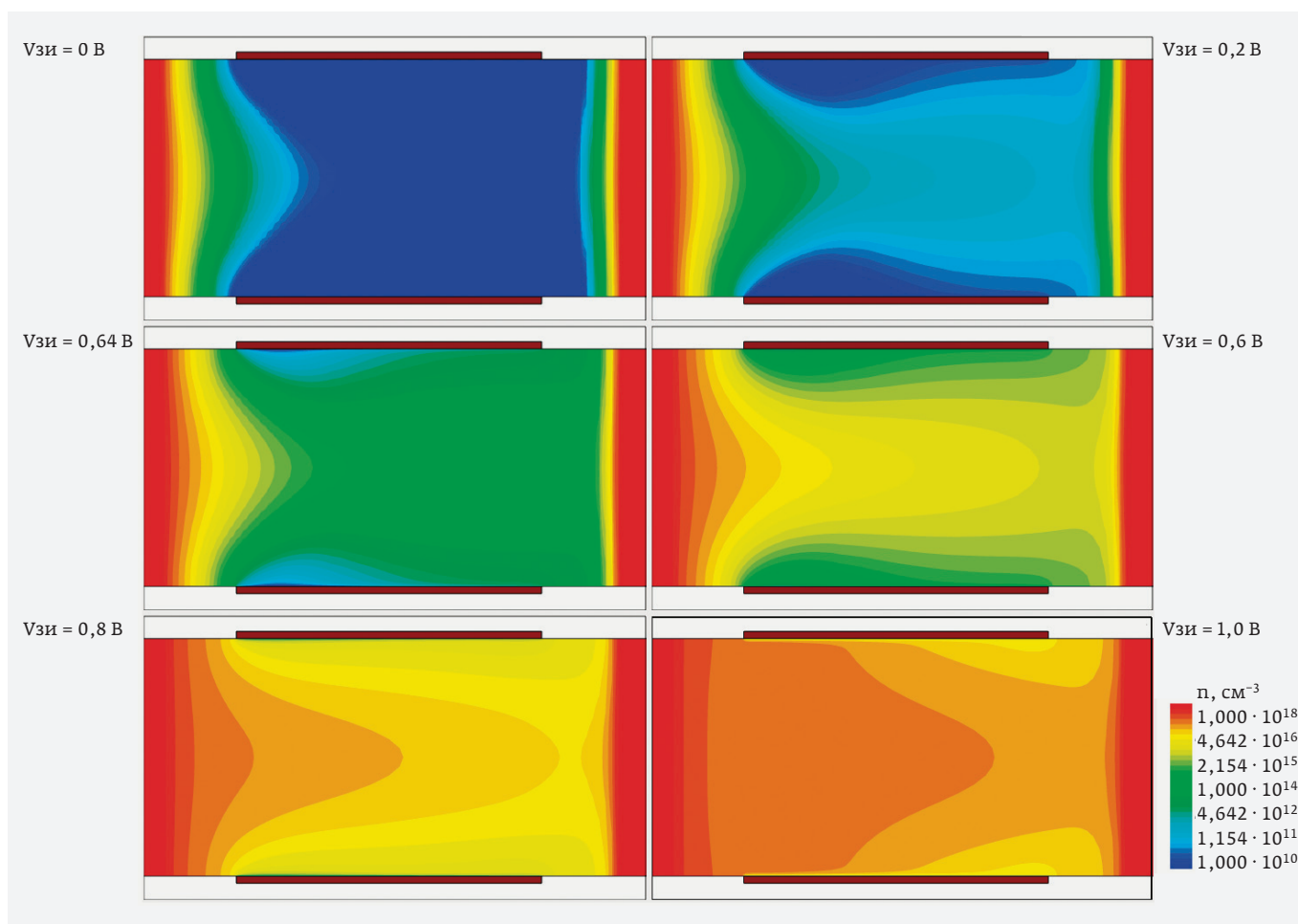


Рис. 9. Распределение концентрации электронов в подложке беспереходного транзистора при разных $V_{зи}$ и $V_{си}=1,2$ В

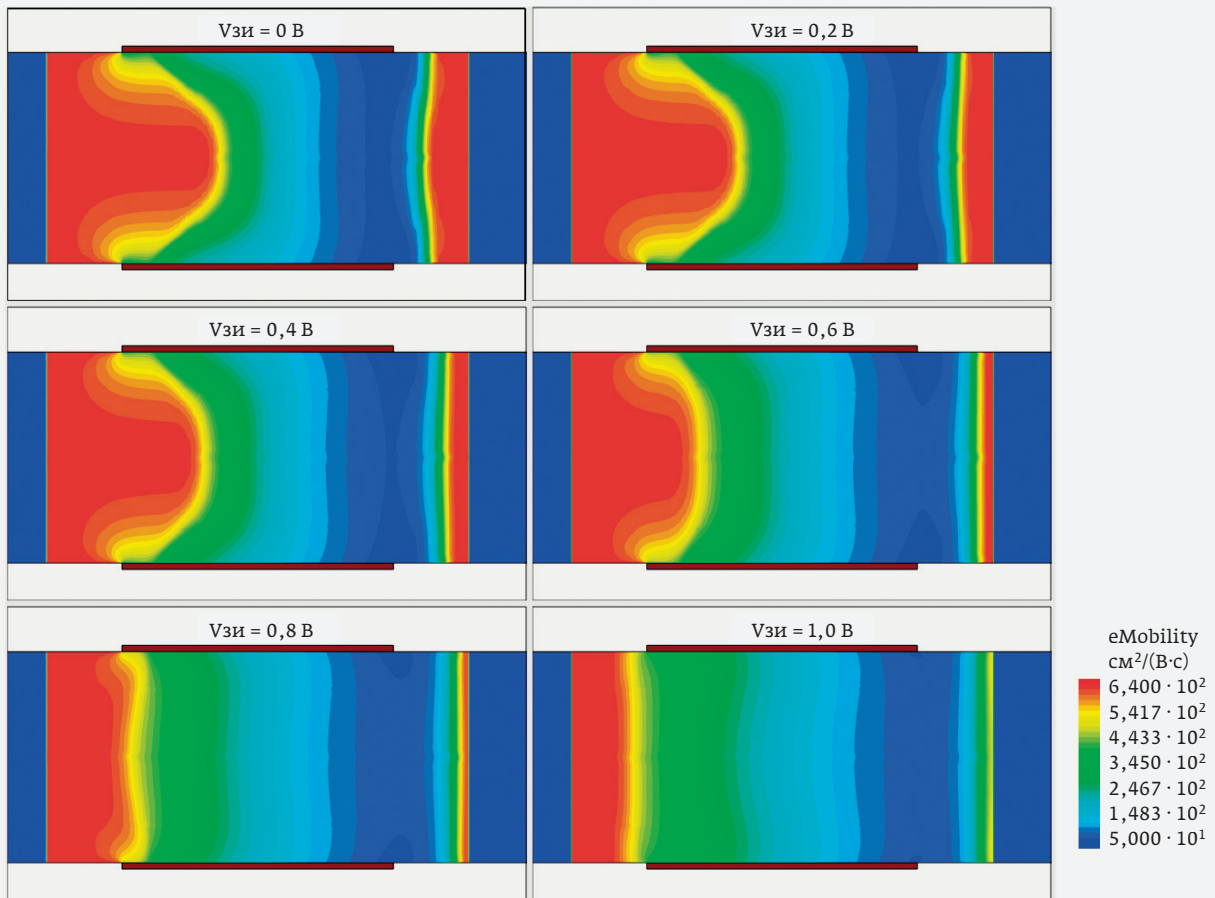


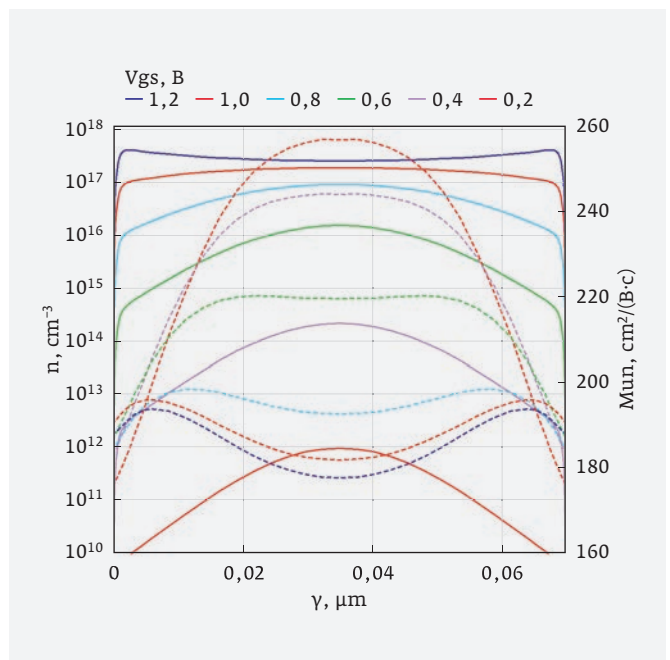
Рис. 10. Распределение подвижности электронов у беспереходного транзистора при разных $V_{зи}$ и $V_{си}=1,2$ В

- ток насыщения, $I_n(V_{си}=1,2$ В);
- ток утечки, $I_{ут}(V_{зи}=0, V_{си}=1,2$ В);
- подпороговый наклон, SS.

Двухмерная модель исследуемого транзистора, созданная в пакете Sentaurus TCAD, показана на рис. 4.

На рис. 5 приведены проходные ВАХ двухзатворного МОП-БПТ. Как следует из графиков, ток утечки при $V_{зи}=0$ начинает существенно расти при концентрации примеси в кремнии больше 10^{17} см⁻³, что и определяет максимально допустимый уровень легирования рабочего тела прибора при дальнейших расчетах.

Рис. 11. Распределение концентрации (сплошные линии) и подвижности (пунктирные линии) электронов в вертикальном сечении середины подложки БПТ при разных $V_{зи}$ и $V_{си}=1,2$ В



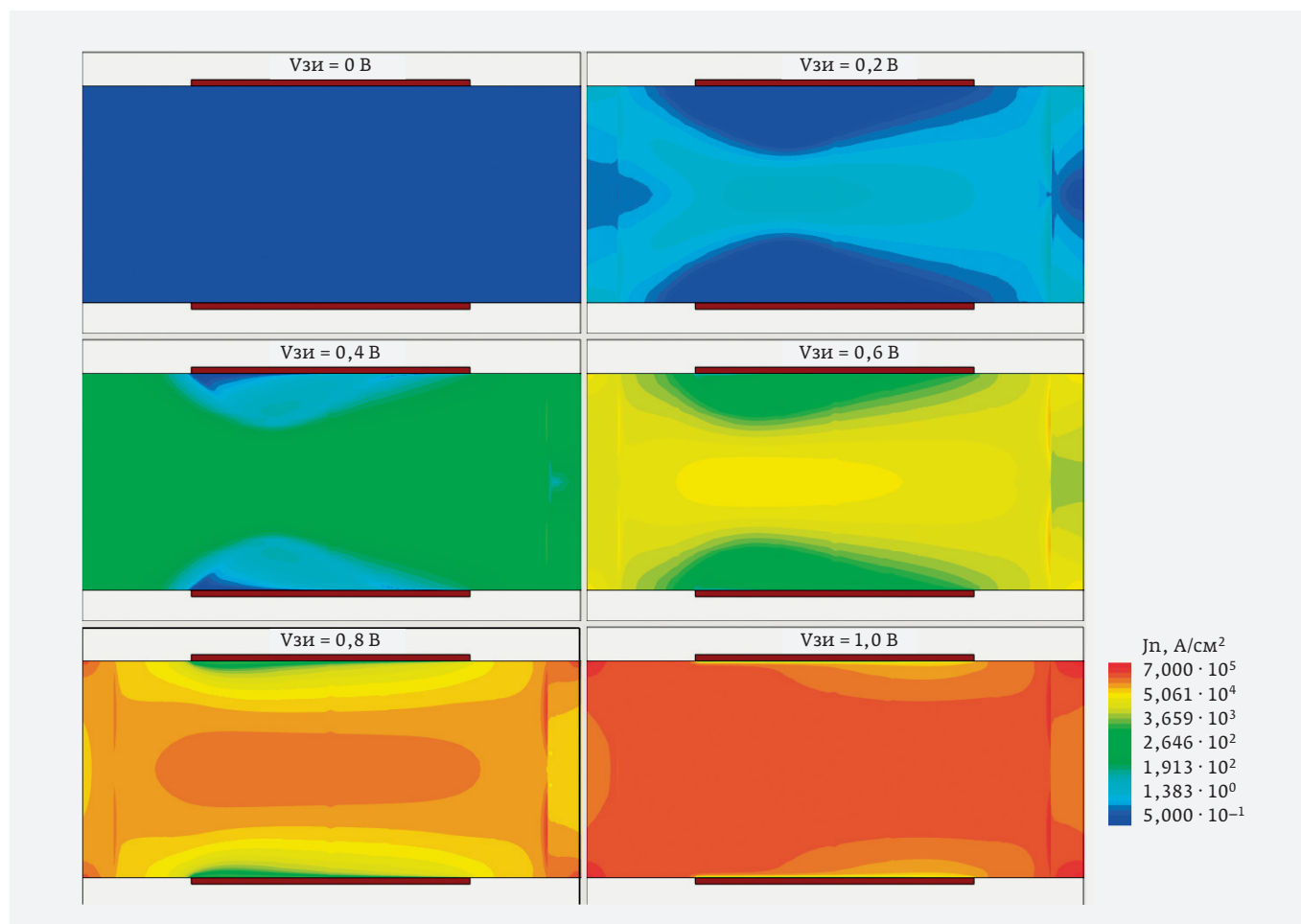


Рис. 12. Распределение плотности электронного тока в подложке БПТ при разных $V_{зи}$ и $V_{си}=1,2$ В

Обработка материала, представленного на рис. 5, позволила построить графики зависимости порогового напряжения, тока насыщения и утечки, а также подпорогового наклона от концентрации примеси в канале N_k БПТ, зависимости показаны на рис. 6–8.

Как следует из рис. 6, для создания МОП БПТ с заданным по технологии 90 нм пороговым напряжением (0,45 В) необходимо легировать тело прибора до уровня $1-1,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Такая концентрация примеси в полупроводнике предотвращает образование инверсного канала при термическом окислении кремния р-типа и увеличивает проводимость рабочего тела транзистора по сравнению с планарным вариантом прибора.

Анализ графиков рис. 7 позволяет сделать вывод, что уровень тока насыщения порядка 320 мкА/мкм при выбранной концентрации примеси в кремнии 10^{17} см^{-3} близок к нормативу для технологии

90 нм. При этом прибор имеет очень низкие токи утечки – порядка $3 \cdot 10^{-13} \text{ А/мкм}$.

Из рис. 8 видно, что подпороговый наклон у БПТ имеет низкую величину – 82 мВ/дек, которая практически не зависит от концентрации примеси в кремнии в диапазоне $N_k = 10^{16}-3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Из приведенных закономерностей можно сделать вывод, что предложенная в данной работе конструкция 3D двухзатворного МОП БПТ позволяет при концентрации примеси в теле прибора 10^{17} см^{-3} , толщине плавника 70 нм и напряжении питания 1,2 В реализовать с использованием технологии 90 нм следующие параметры транзистора:

- пороговое напряжение: 0,45 В;
- подпороговый ток: $3 \cdot 10^{-13} \text{ А/мкм}$;
- ток насыщения: 320 мкА/мкм;
- подпороговый наклон: 82 мВ/дек.

На рис. 9–10 показаны двумерные, а на рис. 11 – одномерные распределения концентрации и под-

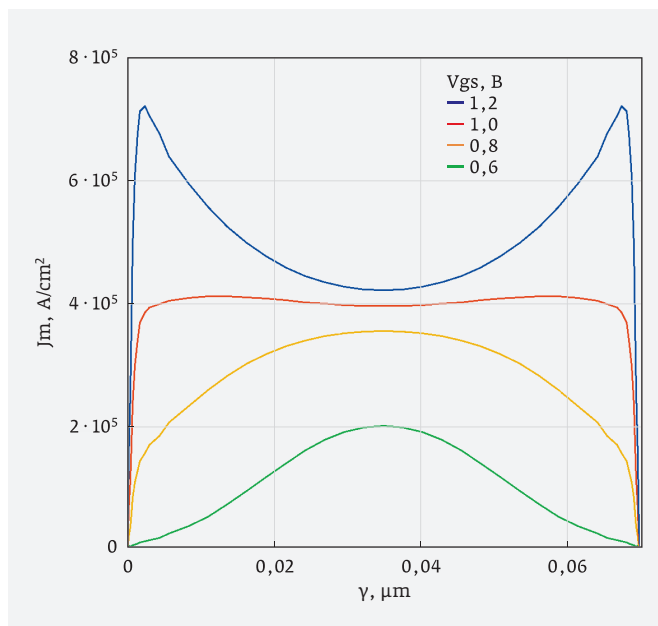


Рис. 13. Распределение плотности электронного тока в вертикальном сечении середины подложки БПТ при разных $V_{зи}$ и $V_{си} = 1,2$ В

вижности электронов в подложке двухзатворного БПТ для разных $V_{зи}$ и $V_{си} = 1,2$ В, $N_k = 10^{17}$ см⁻³. Из рисунков следует, что даже при $V_{зи} = 0$ тело прибора полностью обеднено носителями заряда вследствие смыкания ОПЗ противоположно расположенных затворов, обусловленного влиянием контактной разности потенциалов поликремний/кремний. При создании положительного потенциала на электроде затвора и его увеличении концентрация электронов возрастает, причем прежде всего в объеме подложки, а не вблизи границы Si-SiO₂. Транзистор переходит в режим обогащения электронами приповерхностных областей объемного канала прибора только при $V_{зи} > 1$ В. Также следует отметить что максимум значений концентрации электронов в подложке при режиме обогащения смещен от границы раздела Si-SiO₂ в объем на 1-2 нм из-за квантования энергии электронов в подзатворной области транзистора. Подвижность электронов имеет максимум в объеме подложки вблизи истока и минимальна вблизи стока (в области максимального электрического поля при $V_{си} = 1,2$ В). Также из графиков видно, что подвижность электронов вблизи стока повышается при увеличении $V_{зи}$ вследствие уменьшения электрического поля между затвором и стоком.

На рис. 12-13 показаны двухмерные и одномерные распределения плотности электронного тока в подложке двухзатворного БПТ, из которых видно,

что ток в теле прибора при нуле на затворе отсутствует и возникает в объеме подложки лишь при положительном потенциале на электроде затвора, причем при $V_{зи} > 1$ В образуются дополнительные обогащенные электронами приповерхностные области, за счет которых – в основном при дальнейшем увеличении положительного потенциала на затворе – повышается проводимость канала прибора.

ВЫВОДЫ

Средствами TCAD проведено математическое моделирование трехмерного двухзатворного конструктивного варианта беспереходного МОП-транзистора с использованием технологической нормы 90 нм. Определены зависимости основных параметров транзистора от концентрации примеси в рабочем теле прибора и показано, что трехмерная двухзатворная структура позволяет увеличить концентрацию примеси в кремнии, приводящую к повышению проводимости канала при сохранении величины порогового напряжения. Получено распределение концентрации, подвижности и плотности тока электронов в объемном канале прибора при различных напряжениях на затворе. Установлено, что по сравнению с планарным вариантом 3D беспереходной МОП-транзистор при технологических нормах 90 нм имеет меньшую площадь и больший ток насыщения – 320 мкА/мкм, подпороговый ток – $3 \cdot 10^{-13}$ А/мкм, подпороговый наклон – 82 мВ/дек, что являются существенно лучшими параметрами, чем у традиционных МОП-транзисторов при сопоставимой величине тока насыщения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee C., Afzalian A., Colinge J., Yan R., Ferain I., Akhavan N. Multigate junctionless field-effect transistor // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol. 94. No. 5. P. 053511-053512.
2. Rios R., Cappellani A., Armstrong M., Budrevich A., Gomez H., Pai R., Rahhal-orabi N., Kuhn K. Comparison of junctionless and conventional trigate transistors with lg down to 26 nm // IEEE Electron Device Letters. 2011. Vol. 32. P. 1170-1172.
3. Gundapaneni S., Ganguly S., Kottantharayil A. Enhanced electrostatic integrity of short-channel

- junctionless transistor with high- κ spacers // IEEE Electron Device Letters. 2011. Vol. 32. P. 1325-1327.
4. **Lee C., Yan R., Ferain I., Kranti A., Akhvan N., Razavi P., Yu R., Colinge J.** Nanowire zero-capacitor DRAM with transistors and without junctions // Proc. 10th IEEE-NANO. Aug. 2010. P. 242-245.
 5. **Kranti A., Lee C., Ferain I., Yan R., Akhavan N., Razavi P., Yu R., Armstrong G., Colinge J.** Junctionless 6T SRAM cell // Electron. Lett. 2010. Vol. 46. No. 22. P. 1491-1493.
 6. **Королев М. А., Чаплыгин Ю. А., Ключников А. С., Ефимова Д. И.** Планарный КНИ беспереходной МОП-транзистор // Электронная техника Сер.3. Микроэлектроника. 2018. Вып. 1(169). С. 5-13.
 7. **Hisamoto D., Kaga T., Kawamoto Y., Takeda E.** A fully depleted lean channel Transistor (DELTA)-a novel vertical ultrathin SOI MOSFET // IEEE Electron Device Letters. 1990. Vol. 11. P. 36-39.
 8. **Francis P., Terao A., Flandre D., Wiele F.** Modeling of Ultrathin Double-Gate nMOS/SOI Transistors // IEEE Transactions on Electron Devices. 1994. Vol. 41. No. 5. P. 715-720.
 9. **Singh J., Ciavatti J., Sundaram K., Wong J. S., Bandyopadhyay A., Zhang X., Li S., Bellaouar A., Watts J., Lee J. G., Samavedam S. B.** 14-nm FinFET Technology for Analog and RF Applications // IEEE Transactions on electron devices. 2018. Vol. 65. No. 1. P. 31-37.
 10. **Королев М. А., Крупкина Т. Ю., Чаплыгин Ю. А.** Приборно-технологическое моделирование при разработке изделий микроэлектроники и микросистемной техники // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2005. № 4-5. С. 64-71.
 11. **Yung-Chun W., Yi-Ruei J.** 3D TCAD Simulation for CMOS Nanoelectronic Devices // 2018. Springer Nature Singapore Pte Ltd.
 12. **Bork I., Moroz V., Bomholt L., Pramanik D.** Trends, demands and challenges in TCAD // Mat. Sci. Eng. B. 2005. Vol. 124-125. P. 81-85.

ОБЗОР МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ В ГЛУБОКОСУБМИКРОННОМ МОП-ТРАНЗИСТОРЕ

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

В данной статье рассматриваются конструктивно-технологические методы подавления короткоканальных эффектов в глубокосубмикронном МОП-транзисторе. Анализируются преимущества и недостатки различных конструкций.

A REVIEW OF METHODS FOR SUPPRESSION OF SHORT-CHANNEL EFFECTS IN DEEP SUBMICRON MOS TRANSISTOR

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

MERI SC

In this article constructive-technological methods for suppression of short-channel effects in deep submicron MOS transistor are considered. Advantages and disadvantages of different constructions are analyzed.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, с масштабированием интегральных схем уменьшается длина канала МОП-транзистора. При уменьшении длины канала снижается возможность контроля области обеднения в канале транзистора с помощью напряжения на затворе. В результате возникает зависимость порогового напряжения от длины канала. Также уменьшается влияние потенциала затвора на ток стока, что приводит к снижению подпорогового S-фактора и увеличению тока утечки [1]. Это связано с влиянием областей обеднения, образуемых сток-источковыми областями при малой длине канала (рис. 1).

Значительное влияние на надежность транзисторов оказывают такие короткоканальные эффекты, как инжекция горячих носителей в окисел, DIBL-эффект, насыщение дрейфовой скорости носителей в канале, эффект модуляции длины канала и т. д. Подавление короткоканальных эффектов является одним из важнейших вопросов обеспечения надежности глубокосубмикронных микросхем. В данной статье рассмотрен ряд конструктивно-технологических методов, способствующих подавлению короткоканальных эффектов в глубокосубмикронном МОП-транзисторе.

КНИ МОП-ТРАНЗИСТОР С ИЗОЛИРУЮЩИМИ ОБЛАСТЯМИ ПОД ЗАХОРОНЕННЫМ СЛОЕМ ОКИСЛА

При изготовлении глубокосубмикронного КНИ МОП-транзистора необходимо выполнение таких условий, как низкий DIBL-эффект и высокое значение крутизны подпорогового наклона. В случае короткоканального КНИ МОП-транзистора увели-

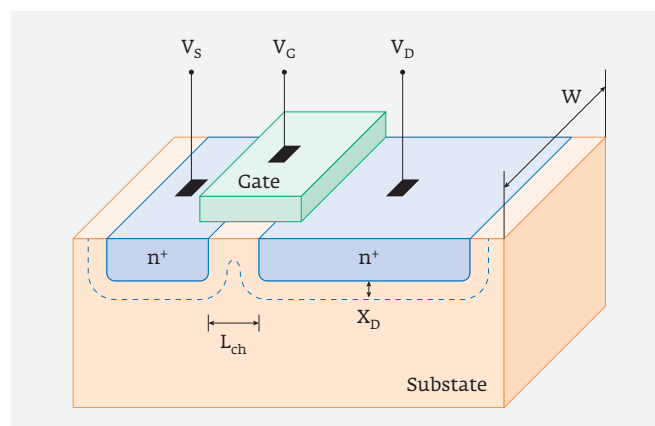


Рис. 1. Распределение областей пространственного заряда в короткоканальном МОП-транзисторе

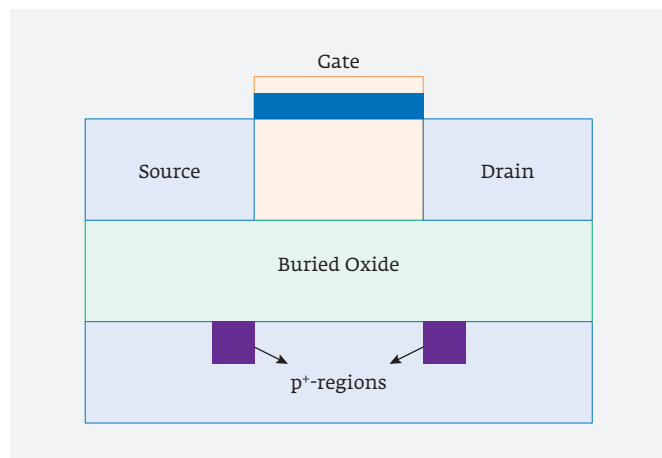


Рис. 2. Структура КНИ МОП-транзистора с изолирующими p⁺-областями

чение толщины захороненного оксида приводит к увеличению DIBL-эффекта за счет проникновения линий электрического поля стока в канал через слой оксида [2]. В результате при увеличении толщины захороненного оксида снижается крутизна подпороговой характеристики.

Для предотвращения проникновения линий электрического поля стока в область канала в кремниевой подложке под слоем захороненного оксида могут быть сформированы сильнолегированные области с таким же типом примеси, что и подложка (рис. 2). Они препятствуют распространению электрического поля и тем самым позволяют уменьшить влияние DIBL-эффекта.

Метод применим для транзисторов на КНИ-подложке, причем для того чтобы он был эффективным, необходимо, чтобы толщина захороненного оксида была меньше длины канала. При большей толщине захороненного оксида возникнет нежелательный рост подпорогового S-фактора.

МОП-ТРАНЗИСТОР С РЕТРОГРАДНЫМ ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ КАНАЛА

В качестве метода подавления короткоканальных эффектов может быть применен ретроградный профиль легирования. Такой профиль имеет низкую концентрацию легирующей примеси вблизи поверхности транзистора со ступенчатым ростом концентрации по направлению вглубь подложки [3]. Более низкая концентрация у поверхности имеет такие преимущества, как высокая подвижность носителей и меньшее пороговое напряжение. Расположение пикового значения концентрации легирующей

примеси на небольшом расстоянии от поверхности позволяет предотвратить эффект смыкания p-n переходов стока и истока, а также снизить DIBL-эффект. Снижение концентрации по направлению вглубь подложки приводит к снижению ёмкости p-n перехода сток-подложка и снижает эффект влияния подложки на пороговое напряжение.

Из недостатков применения ретроградного профиля легирования следует отметить высокую паразитную ёмкость p-n-переходов и ёмкость области пространственного заряда под затвором. Это приводит к уменьшению быстродействия транзистора и снижению крутизны подпороговой характеристики.

МОП-ТРАНЗИСТОР С РОCKET-ОБЛАСТЯМИ

Для подавления короткоканальных эффектов также применяется формирование rocket-областей [1]. Данные области формируются возле сток-истоковых областей с помощью ионной имплантации под заданным углом к поверхности (рис. 3). В качестве маски для процесса ионной имплантации используется затвор. Процесс имплантации rocket-областей может происходить как перед имплантацией ldd-областей, так и перед формированием сток-истоковых областей.

Высокая концентрация легирующей примеси в rocket-областях позволяет уменьшить эффект смыкания областей пространственного заряда стока и истока. Следовательно, появляется возможность использовать меньшую дозу легирования в области канала транзистора и добиться меньшего спада порогового напряжения при малых значениях длины канала. Кроме того, применение rocket-областей с противоположным типом примеси относительно областей сток-истока позволяет уменьшить DIBL-эффект.

Применение данного метода позволяет оптимизировать короткоканальные характеристики без

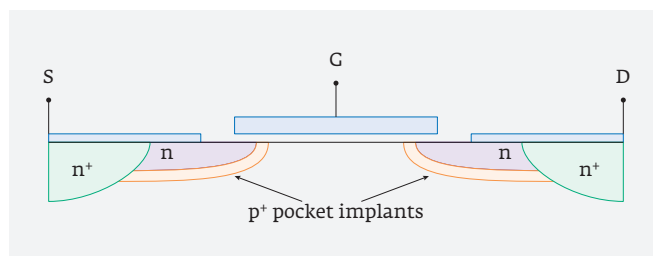


Рис. 3. Поперечное сечение МОП-транзистора с rocket-областями

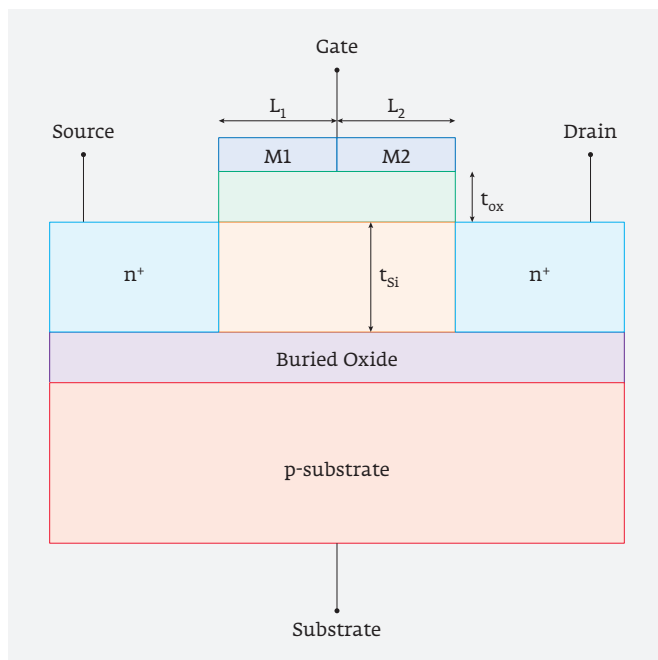


Рис. 4. Структура МОП-транзистора с затвором из двух материалов

снижения подпорогового размаха, а также снизить ёмкость р-п-переходов. Использование рокет-областей позволяет добиться высокого быстродействия МОП-транзистора и снизить рассеиваемую мощность.

МОП-ТРАНЗИСТОР С ЗАТВОРОМ ИЗ ДВУХ МАТЕРИАЛОВ

Одним из методов подавления короткоканальных эффектов в МОП-транзисторе является применение конструкции затвора, состоящей из двух материалов (рис. 4). Затвор изготавливается из двух металлов, расположенных встык и имеющих различную работу выхода [4]. При этом работа выхода металла, расположенного со стороны истока должна быть больше, чем у металла со стороны стока для п-канального транзистора, и наоборот в случае р-канального. Такая конструкция затвора создаёт ступенчатый профиль распределения поверхностного потенциала в области канала.

Ступенчатое распределение потенциала приводит к возникновению пика напряженности электрического поля в канале транзистора под границей перехода между металлами, в результате чего

становится возможным увеличение среднего электрического поля в канале, и, соответственно, увеличивается дрейфовая скорость носителей заряда [5]. Пик электрического поля вблизи стока уменьшается, тем самым уменьшается влияние эффекта горячих носителей. Часть затвора, расположенная со стороны стока, за счет отличающейся работы выхода препятствует влиянию электрического поля стока на ту область канала, которая расположена под частью затвора со стороны истока, в результате чего уменьшается влияние DIBL-эффекта.

Данный конструктивно-технологический метод является одним из наиболее эффективных для подавления короткоканальных эффектов. Конструкция с затвором из двух материалов позволяет эффективно снижать влияние эффекта горячих носителей, модуляции длины канала и DIBL-эффекта, а также увеличить дрейфовую скорость носителей заряда в канале транзистора.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chaudhry A., Kumar M. J.** Controlling short-channel effects in deep-submicron SOI MOSFETs for improved reliability: a review // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2004. Vol. 4. Is. 1. PP. 99–109.
2. **Kumar M. J., Siva M.** The Ground Plane in Buried Oxide for Controlling Short-Channel Effects in Nanoscale SOI MOSFETs // IEEE Transactions on Electron Devices. 2008. Vol. 55. Is. 6. PP. 1554–1557.
3. **De I., Osburn C. M.** Impact of super-steep-retrograde channel doping profiles on the performance of scaled devices // IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 46. Is. 8. PP. 1711–1717.
4. **Long W., Ou H., Kuo J.-M., and Chin K. K.** Dual material gate (DMG) Field Effect Transistor // IEEE Trans. Electron Device. 1999. Vol. 46. PP. 865–870.
5. **Saxena M., Haldar S., Gupta M.** Physics-based analytical modeling of potential and electrical field distribution in dual material gate (DMG)-MOSFET for improved hot electron effect and carrier transport efficiency // IEEE Transactions on Electron Devices. 2002. Vol. 49. Is. 11. PP. 1928–1938.

ТЕХНОЛОГИЯ МЕМРИСТОРОВ

► А. Н. Палагушкин, Ф. А. Юдкин, С. А. Прокопенко, А. П. Сергеев
ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН

Исследования направлены на создание перспективных элементов энергонезависимой высокоскоростной радиационно-стойкой резистивной памяти сверхбольшого объема, основанной на новых физических принципах функционирования. Изучены оптические параметры активной среды мемристоров с использованием метода SPR. Вероятно, что механизмы переключения мемристоров основаны на теории филаментов, дополненной физикой аморфных широкозонных полупроводников. Этот подход позволит усовершенствовать технологию создания элементной базы для нейроморфных систем.

TECHNOLOGY OF MEMRISTORS

A. N. Palagushkin, F. A. Yudkin, S. A. Prokopenko, A. P. Sergeev
SRISA

Current investigations are aimed to creation of innovation elements for radiation-resistant nonvolatile fast storage of very large volume, based on new physical functionality principles. Optical parameters of memristor active medium were investigated using SPR method. The memristors switching mechanisms were explained using filaments theory, extended by physics of amorphous wide-band semiconductors. This can improve the technology of elements for neuromorphic systems.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство опубликованных результатов проведенных исследований по разработке энергонезависимой цифровой памяти [1] и элементной базы нейроморфных систем [2] на основе мемристорных структур ReRAM [3] пока не обеспечивает стабильного результата, необходимого для их практического применения. Цель данных исследований заключается в выявлении преобладающих физических процессов, лежащих в основе механизмов переключения сопротивления активных сред мемристоров и поиске способов контроля этих основных процессов [4], выяснении их связи с используемой технологией изготовления и полученными характеристиками материала. Обсуждение этих вопросов поможет уменьшить разброс рабочих параметров мемристорных наноструктур и стабилизировать их электрические характеристики.

Несмотря на кажущуюся простоту структурной ячейки ReRAM, представляющей собой наноструктуру металл – активная среда – металл, физические процессы в ней достаточно сложны [5]. Большинство активных сред [6], используемых в мемристорах относится к классу аморфных широкозонных полупроводников с отклонением от стехиоме-

трического состава. Полупроводниковые свойства аморфных активных сред мемристорных наноструктур пока также мало учитываются. Исследовано большое количество простых, комбинированных и многослойных сред, но оптимальных по воспроизводимости и стабильности параметров материалов не найдено.

В большинстве публикаций отмечается, что осаждение материалов производится при низких температурах, что определяет их аморфное состояние. Часто применяемый последующий отжиг одновременно изменяет структуры молекулярных кластеров и ненасыщенных связей, влияет на отклонение от стехиометрического состава аморфных покрытий. Допустимые температуры отжига ограничены до 300 °С для последующей возможности интеграции с кремниевой технологией. Свойства материалов в аморфном состоянии менее воспроизводимы и стабильны, существенно отличаются от кристаллов, непосредственно зависят от применяемых технологических методов и условий их получения [7].

Значительная пористость, размер молекулярных кластеров, стехиометрия аморфных полупроводниковых сред определяют особенности их

оптических и электрических характеристик [8]. Специальные методы анализа, включающие рентгеновскую дифракцию, оптические, электрофизические и ряд других, позволяют определить полученное аморфное состояние активной среды мемристора, изготовленного в конкретных технологических условиях.

Осаждение материала при низких (комнатных) температурах приводит к образованию слоев, состоящих из молекулярных кластеров и пор между ними, имеющих характерные размеры порядка ~ 10 нм. С повышением температуры, увеличением поверхностной миграции молекул и толщины слоя размеры кластеров увеличиваются до ~ 40 нм. На рентгеновской дифрактограмме такого материала дифракционные пики отсутствуют, и по этому признаку его состояние характеризуется как аморфное. Расположение кластеров хаотично, и присутствует много свободных межатомных связей. При этом, он проявляет ряд характерных полупроводниковых свойств, таких как температурная зависимость проводимости, близкая к монокристаллу ширина запрещенной зоны и ряд других. При повышении температуры осаждения и толщины слоя кластеры увеличиваются и коалесцируют, изменяют фазовый состав и переходят в нано- и микрокристаллическое состояние, уже создающее дифракционные пики присутствующих кристаллографических фаз на рентгенограмме. Похожая тенденция наблюдается и при термическом отжиге аморфных материалов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выяснения влияния температуры осаждения на свойства аморфных полупроводниковых активных сред мемристоров нами в качестве базового материала был выбран подробно исследованный и впервые использованный фирмой Hewlett-Packard (USA) оксид титана [9]. Стехиометрический TiO_2 относится к широкозонным полупроводникам ($E_g = 3,2$ eV), а параметры мемристоров на основе аморфных слоев, с отклонением от стехиометрического состава $\alpha\text{-TiO}_x$, приведены в массе последующих публикаций.

Для нанесения покрытий нами использовалась электроннолучевая установка L-560Q (Leybold-Heгаeus) с безмасляной системой откачки и электронной пушкой, непосредственно распыляющей таблетку TiO_2 из водоохлаждаемого медного тигля. Использовалась отечественная двуокись титана для оптических целей ТУ6-09-17-171-81 производства

Ставропольского ЗАО «НПФ Люминофор». Предварительно химически очищенные подложки из кварца, кварца с металлическими покрытиями из Ag, ситалла и стекла прогревались до 250 °C для обезгаживания при вакууме 10^{-6} mTorr и затем температура опускалась до заданной в диапазоне от 50 до 250 °C. Осаждение слоя проводилось при $2 \cdot 10^{-5}$ mTorr, ускоряющем напряжении 11 кВ и мощности ~ 500 Вт на неподвижные, размещенные в одной кассете вышеуказанные подложки. Скорость нанесения стабилизировалась $0,5 \pm 0,1$ Å/с контролем по кварцевому монитору Inficon. Толщины (масса) наносимых слоев $\alpha\text{-TiO}_x$ составляли 200 нм с точностью $\pm 0,5$ нм. Ориентировочное время нанесения – ~ 60 мин. Слои осажденные из материала, производимого «НПФ Люминофор», обладали малым поглощением света и незначительным отклонением от стехиометрии.

1.1. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОПУСКАНИЯ СЛОЕВ $\alpha\text{-TiO}_x$

Измерения проводились на спектрофотометре Lambda-14 (Perkin-Elmer). Для образцов на кварцевых подложках со слоями $\alpha\text{-TiO}_x$ в области их прозрачности измерялось спектральное пропускание, а на крае фундаментального поглощения – спектральное поглощение (рис. 1). Из интерференционных спектров пропускания определялась диспер-

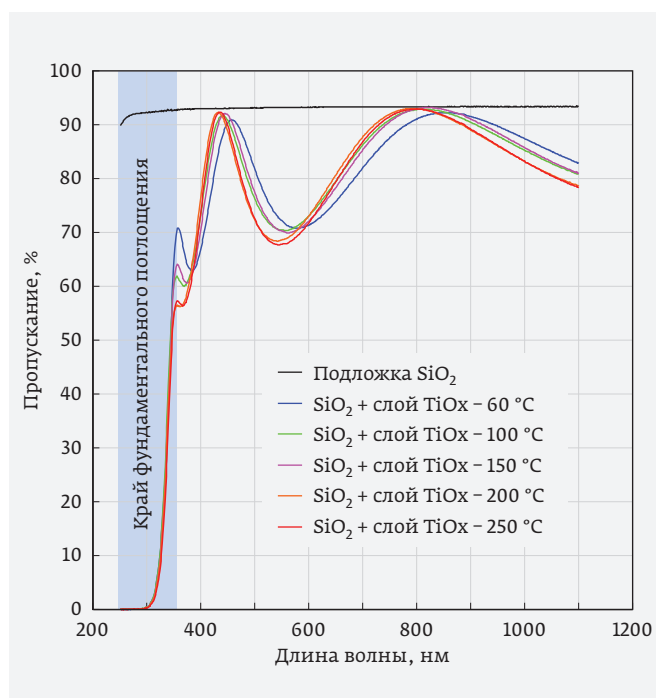


Рис. 1. Спектры пропускания слоев

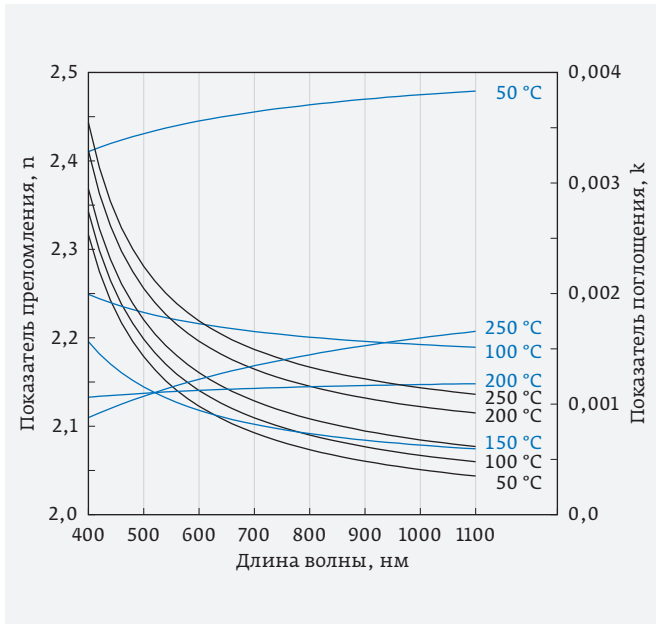


Рис. 2. Дисперсия $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$

сионная зависимость показателей преломления, поглощения и толщина слоев в зависимости от температуры осаждения (рис. 2).

На графиках $n(\lambda)$ отмечается возрастание показателя преломления с увеличением температуры осаждения, причем в интервале темпера-

тур 150...200 °C наблюдается скачок его величины. Изменения показателя преломления связаны с изменением структуры и плотности слоев.

Коэффициент поглощения $k(\lambda)$ существенно изменяется от температуры в диапазонах 50...100 °C и 150...200...250 °C. Его величина определяется концентрацией избыточного Ti (отклонением от стехиометрии) и слабым релеевским рассеянием света на кластерах и порах в аморфных слоях.

По краю фундаментального поглощения определялась ширина запрещенной зоны от температуры осаждения методом Таука (рис. 3). При всех температурах осаждения присутствовали хвосты Урбаха и наблюдались изменения E_g от температуры. Это связано с трансформацией структуры запрещенной зоны, видоизменением в ней уровней локализованных состояний. Электрическая проводимость аморфного материала зависит от состояния запрещенной зоны и может приводить к скачкам сопротивления мемристоров. Подробнее это явление может быть исследовано методами фотолюминесценции и импульсной фотопроводимости.

Изменения плотности материала и его показателя преломления взаимосвязаны, по ним можно оценить пористость слоев. Для этого использованы измеренные дисперсионные зависимости показате-

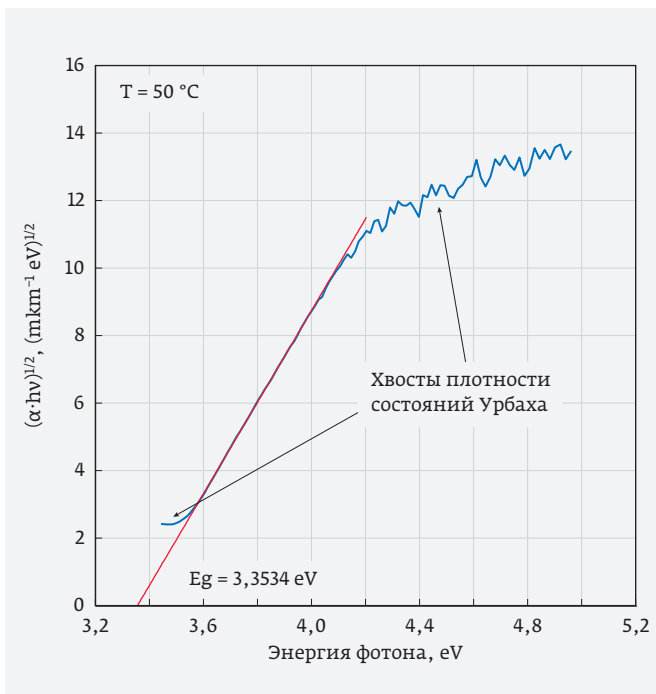


Рис. 3. Диаграмма Таука

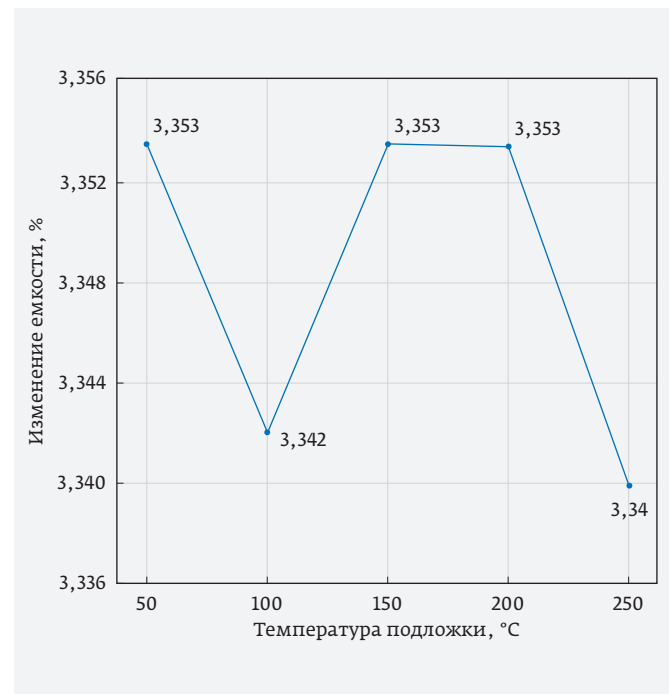


Рис. 4. Температурная зависимость E_g

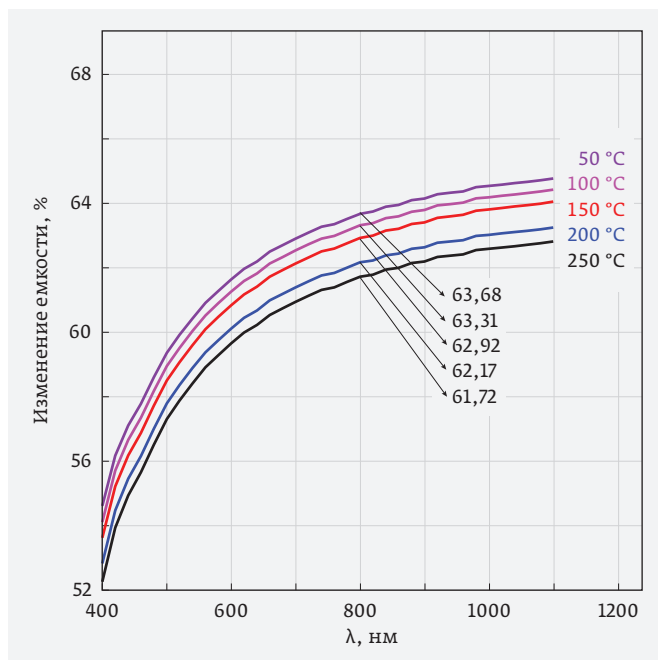


Рис. 5. Спектральная зависимость

телей преломления слоев и база данных Sopra [10] – для монокристалла TiO_2 (рутил). Результаты представлены на рис. 5. Зависимость изменения пористости слоев от температуры осаждения ($l = 800$ нм) показана на рис. 6.

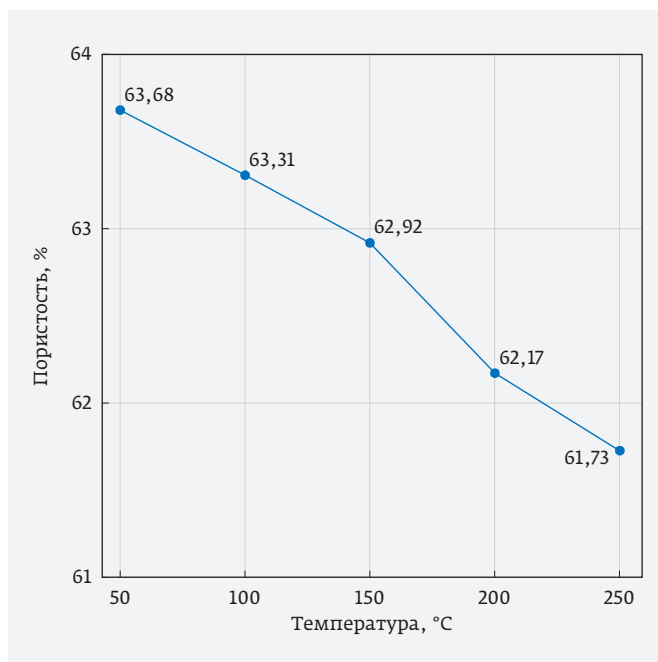


Рис. 6. Температурная зависимость

1.2. ИЗМЕРЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ СЛОЕВ $a-TiO_x$ МЕТОДОМ SPR

Влияние температуры осаждения на оптические характеристики, толщины слоев и их стабильность во времени исследовали методом поверхностного плазмонного резонанса (SPR). Этот метод обладает высокой чувствительностью к изменению оптических параметров и толщины нанопокровов [11, 12]. Измерения выполнялись на автоматизированной гониометрической установке [13] с длиной волны лазера 632,8 нм по схеме Кречмана. Заданная толщина слоя $a-TiO_x$ ($200 \pm 0,5$ нм) соответствовала 2-й моде плазмонного волновода в структуре $Ag-Al_2O_3-a-TiO_x$. Измерения SPR проводились через сутки после нанесения слоев $a-TiO_x$ при разных температурах осаждения (рис. 7). Измерялись нарушенные угловые зависимости полного отражения до, сразу после нанесения слоя $a-TiO_x$ на покрытия $Ag(55$ нм) $-Al_2O_3$ (защитный слой – 3 нм) и через двое, трое и четверо суток после этого (рис. 8).

Результаты измерений показывают сильное влияние температуры осаждения на оптические характеристики и толщину (плотность) слоев $a-TiO_x$. Обнаружен значительный сдвиг и изменение формы плазмонного резонанса (рис. 8), вызванного временной релаксацией аморфной

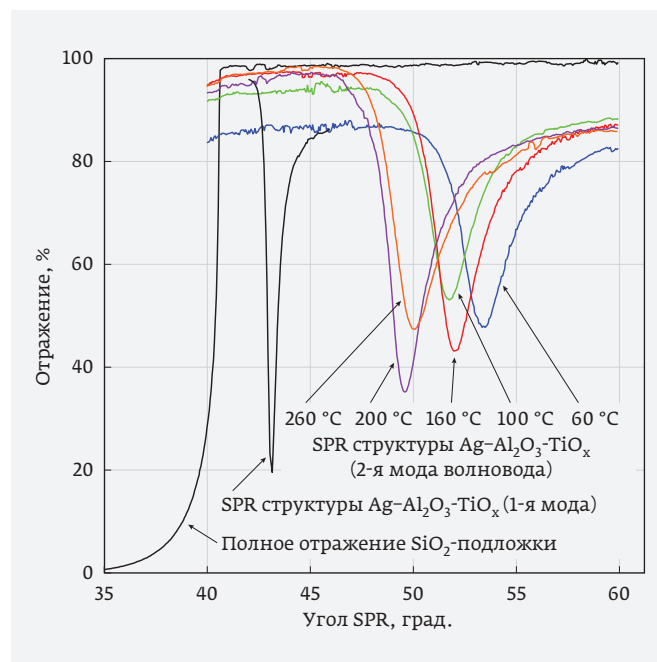


Рис. 7. Влияние на SPR температуры

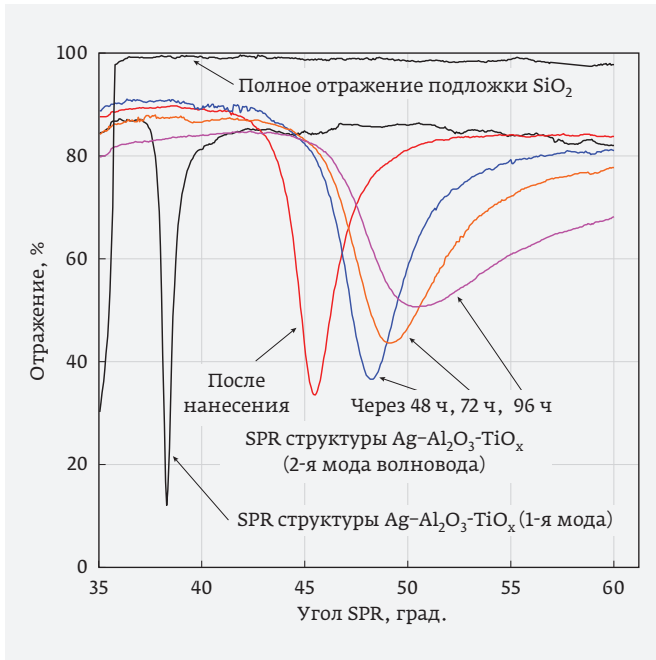
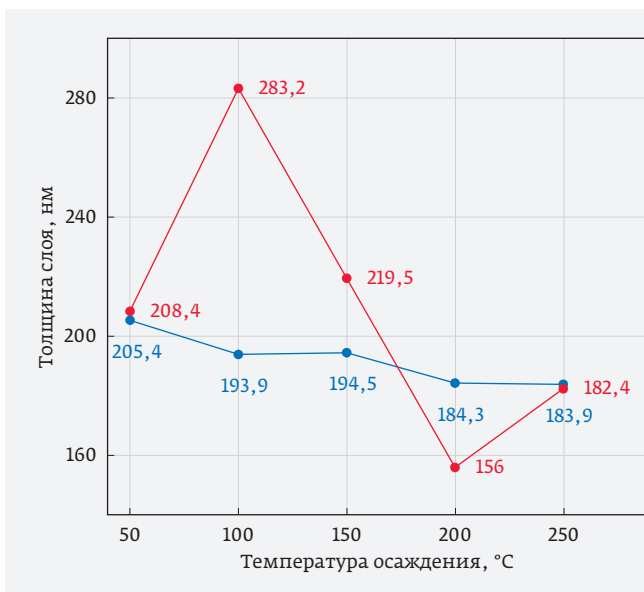


Рис. 8. Изменение SPR во времени

структуры свежесозданного слоя α -TiO_x, а также поглощением кислорода и влаги из воздуха.

По резонансным зависимостям SPR (рис. 7) были рассчитаны оптические параметры (при $\lambda = 632,8$ нм) и толщины слоев. Эти измерения проводились одновременно с измерением спектров пропускания (рис. 1), для исключения влияния временной релаксации. Графики зависимости толщин слоев от температуры осаждения, полученные при интерференционных измерениях



и методом SPR, показаны на рис. 9. Их различие вызвано тем, что при спектральных измерениях оптическое излучение проходит слой по нормали к его поверхности и отражает суммарную характеристику слоя по его толщине. При SPR - оптическая поверхностная волна распространяется над поверхностью металла (Ag), вдоль слоя α -TiO_x и частично в воздухе вдоль его поверхности, фиксируя неоднородность слоя по его толщине (рис. 10). Эти данные коррелируют с измерениями дисперсии показателя поглощения (рис. 2) и ширины запрещенной зоны (рис. 4.) в диапазонах температур осаждения 50...150 °C и 200...250 °C. Вероятно, что наблюдаемые отклонения вызваны значительной неоднородностью и изменением плотности слоев по их толщине, не зависящей от постоянства скорости осаждения и других стабилизированных технологических условий, кроме температуры осаждения. Это связано с механизмами изменения аморфной структуры слоев в процессе их осаждения при разных температурах. Используя послойный рентгеновский дифракционный анализ при скользящих углах падения рентгеновского излучения, это явление можно изучить более подробно. Вероятно, что оно характерно для большинства аморфных материалов, и является одной из причин нестабильности их электрических характеристик.

Неоднородность оптических свойств покрытий по их толщине наблюдается при изготовлении интерференционных покрытий и многослойных зеркал [13]. Для уменьшения влияния такого эффекта предлагается представлять один

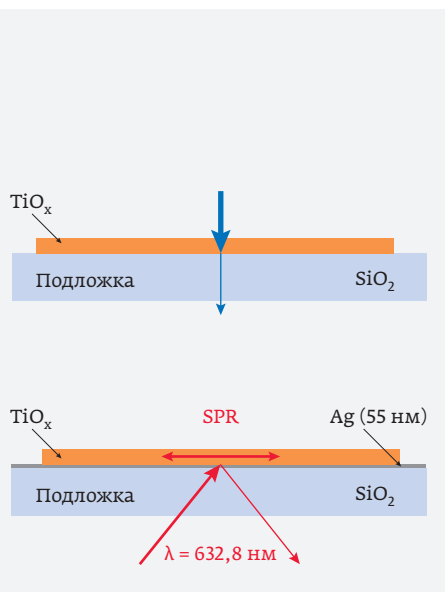


Рис. 9. Измерения толщин слоев α -TiO_x интерференционным и SPR методами

слой в виде двух слоев со своими дисперсионными параметрами.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные эксперименты и результаты измерений подтверждают преобладающее влияние технологических методов и конкретных режимов осаждения аморфных активных сред мемристорных структур на их свойства. Даже в почти идеальных условиях вакуума проявляется внутренний механизм формирования неоднородного аморфного слоя, его длительная временная релаксация, что может сильно сказываться на воспроизводимости и стабильности электрических параметров мемристоров. Высокая пористость активной аморфной среды и каталитические свойства многих используемых для нее материалов, приводят к абсорбции влаги и газов из атмосферы, внося дополнительную нестабильность [14].

Одновременное применение оптического спектрального и SPR метода измерений позволяют оценить состояние и релаксацию аморфной среды активных слоев, их зависимость от методов и режимов осаждения, использоваться при поиске оптимальных технологических условий. Очень эффективно использование методов рентгеновского анализа [15].

Можно попытаться улучшить стабильность аморфных сред, используя низкотемпературный (до 300 °С) отжиг в инертных или активных средах. Необходимо исследовать влияние на структуру аморфной среды отклонений от стехиометрического состава и легирование стабилизирующими примесями. Для этого наиболее подходит метод магнетронного реактивного распыления и осаждения слоев в максимально стабильных условиях [16].

Необходимо отметить, что многие технологические методы осаждения связаны с высокоэнергетическим воздействием на слои электронного и ионного облучения в процессе формирования слоя заданной толщины. На основе теории проводящих каналов (филаментов), они могут образовываться уже в процессе изготовления мемристоров. Применяемые способы их последующей электрической формовки проводятся при напряжениях в единицы вольт, что на порядки меньше полей, возникающих при изготовлении. Этот фактор нестабильности также необходимо учитывать и подавлять, применяя электрическое смещение и экранирование осаждаемых слоев.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены возможные причины нестабильности параметров мемристорных наноструктур, вызванные технологией изготовления. Для их устранения необходимо дополнительно учитывать особенности физических свойств аморфных широкозонных полупроводников, применяемых в активных средах мемристоров.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

Работа выполнена в рамках проекта № АААА-А18118041390064-3.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEEE SOLID-STATE CIRCUITS MAGAZINE, SPRING 2016, VOL.8, No.2, p.44. <https://doi.org/10.1109/mssc.2016.2548431>.
2. **Wang Z., Joshi S., Savel'ev S.E., Jiang H., Midya R., Lin P., Hu M., Ge N., Strachan J. P., Li Z., Wu Q., Barnell M., Li G.-L., Xin H. L., Williams R. S., Xia Q., Yan J.J.** Memristors with diffusive dynamics as synaptic emulators for neuromorphic computing. *Nature Materials*, 16, pp. 101-108., 2017. <https://doi.org/10.1038/nmat4756>.
3. **Adamatzky A., Chua L.** Memristor Networks. Springer International Publishing Switzerland, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02630-5>.
4. **Strachan J. P., Yang J.J., Montoro L. A., Ospina C. A., Ramirez A.J., Kilcoyne A. L. D., Medeiros-Ribeiro G. and Williams R. S.** Characterization of electroforming-free titanium dioxide memristors. *Beilstein J. Nanotechnol*, 4, pp. 467-473, 2013, doi:10.3762/bjnano.4.55.
5. **Ee Wah Lim and Razali Ismail.** Conduction Mechanism of Valence Change Resistive Switching Memory: A Survey. *Electronics*, No 4, 586-613, 2015, doi:10.3390/electronics4030586.
6. **Amit Prakash, Debanjan Jana and Siddheswar Maikap.** TaOx-based resistive switching memories: prospective and challenges. *Nanoscale Research Letters* 2013, 8:418, doi:10.1186/1556-276X-8-418.
7. Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials. Safa Kasap, Peter Capper (Eds.), ISBN: 978-3-319-48931-5, e-ISBN: 978-3-319-48933-9, DOI 10.1007/978-3-319-48933-9, Springer International Publishing, 1537 p., 2017.
8. **Jai Singh and Koichi Shimakawa.** Advances in Amorphous Semiconductors. Taylor & Francis Inc, ISBN0-415-28770-7, 2003. <https://doi.org/10.1201/9781420023848>.

9. **Joshua Yang J., Byung Joon Choi, Min-Xian Zhang, Torrezan A. C., Strachan J. P., Williams R. S.** Memristive Devices for Computing: Mechanisms, Applications and Challenges. HP Laboratories, HPL-2013-48, to be published in USLI Process Integration 8 at the 224th Electrochemical Society Meeting, San Francisco October 27 – November 1, 2013. <https://doi.org/10.1149/05809.0009ecst>.
10. SOPRA, <http://www.sspectra.com/files/misc/win/SOPRA.EXE/>
11. Handbook of Surface Plasmon Resonance. Edited by R.B.M. Schasfoort and Anna J. Tudos, The Royal Society of Chemistry, 2008, DOI 10.1039/9781847558220.
12. **Kryzhanovsky B.V., Palagushkin A.N., Prokopenko S.A., Sergeev A.P., Melikyan A.O.** Controlling reflectivity of silver-corundum-silver nanostructure by DC voltage. (2013) Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) 22 (1) PP. 1-7, doi: 10.3103/S1060992X13010025.
13. **Palagushkin A.N., Prokopenko S.A., and Sergeev A.P.** Measurement of metal nanolayers optical parameters using surface plasmon resonance method. Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2007, vol. 16, no. 4, pp. 288-294, <https://doi.org/10.3103/S1060992X07040121>.
14. **Amotchkina T., Trubetskov M., Tikhonravov A., Angelov I.B., and Pervak V.** Reliable optical characterization of e-beam evaporated TiO₂ films deposited at different substrate temperatures. APPLIED OPTICS, Vol. 53, No. 4, 2014, <https://doi.org/10.1364/ao.53.0000a8>.
15. **Боуэн Д. К.** Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография. – СПб: Наука, 2002. 270 с. =[Bouen D. K., Vysokorazreshayushchaya rentgenovskaya difraktometriya i topografiya], D. K. Bouen, B. K. Tanner., (SPb.: Nauka, 2002), 270 s. (In Russ.), ISBN5-02-024963-7.
16. **Brus V.V., Kovalyuk Z.D., Parfenyuk O.A., Vakhnyak N.D.** Comparison of optical properties of TiO₂ thin films prepared by reactive magnetron sputtering and electron-beam evaporation techniques. Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2011. Vol. 14, N4. P. 427-431, <https://doi.org/10.15407/spqe014.04.427>.

ПЛАТИНОВЫЕ СТАД-БАМПЫ С ПРИПОЙНЫМИ ШАРИКАМИ НА АЛЮМИНИЕВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КРЕМНИЕВЫХ КРИСТАЛЛОВ В ТЕХНОЛОГИИ FLIP-CHIP

► В. В. Побединский^{1,2}, Н. В. Рогозин², Е. В. Лаврентьев², А. В. Рябов², В. В. Зенин², Е. Н. Бормонтов¹
¹ФГБОУ ВО «ВГУ»; ²АО «НИИЭТ»

Рассмотрены технологические особенности формирования платиновых стад-бампов термозвуковой микросваркой на кремниевых кристаллах с алюминиевой металлизацией контактных площадок. Проанализирована схема процесса нанесения припойных шариков на платиновые стад-бампы для сборки интегральных схем (далее – ИС) по технологии flip-chip.

PLATINUM STUD-BUMPS WITH SOLDER BALLS ON ALUMINUM METALLIZATION OF SILICON DIE IN FLIP-CHIP TECHNOLOGY

V.V. Pobedinsky^{1,2}, N.V. Rogozin², E.V. Lavrentev², A.V. Ryabov², V.V. Zenin², E.N. Bormontov¹

¹VSU; ²RIET SC

Technological features of platinum stud-bumps formation by thermosonic welding on silicon die with aluminum metallization of contact pads were considered. The scheme of process to mount solder balls on platinum stud-bumps for the manufacturing of semiconductor devices by the flip-chip technology was analyzed.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение в отечественной и зарубежной микроэлектронике в производстве интегральных схем в настоящее время получила технология flip-chip, особенностью которой являются припойные шариковые выводы, располагаемые на металлизированных контактных площадках кристаллов ИС. Кристаллы монтируют на основание корпусов или плат планарной стороной. При этом топология контактных площадок кристалла является зеркальным отображением расположения выводов подложки. Этот фактор влияет на надежность изоляции при монтаже перевернутых кристаллов [1].

Использование припойных шариковых выводов обеспечивает не только электрическую связь между кристаллом ИС и подложкой, но и играет важную роль в механической, прочностной, температурной, теплоотводной составляющих микросхем, ре-

ализованных с помощью технологии flip-chip. Соединения на припойном шарике по сравнению с проволочными снижают задержки распространения электрических сигналов, обеспечивают большую пропускную способность и снижают ограничения по шинам питания и заземления [2]. Применение припойных шариков способствует миниатюризации изделия, например, в сфере мобильной связи. Монтаж на припойные шарики вытесняет проволочный монтаж, значительно уменьшая массогабаритные характеристики микросхем. Общий размер площади микросхемы, реализованной методом flip-chip, сводится к сумме размера кристалла и высоты шариковых выводов. Соединения шариковыми выводами экономят до 30–50% занимаемой площади по сравнению со сваркой проволокой [3]. Известно [4], что технология сварки проволокой не обеспечивает минимально необходимые условия прохождения сигнала при скоростях 20–50 Гбит/с,

в отличие от технологии flip-chip, которая способна преодолеть эти ограничения. Важную роль при монтаже припойных шариковых выводов играет материал металлизации, на который наносятся шариковые выводы – Under Bump Metallization (далее UBM) [5, 6]. В основном контактные площадки современных интегральных схем состоят из сплавов на основе алюминия. Несмотря на то, что алюминий обладает относительно высоким удельным сопротивлением по сравнению с другими металлами, такими как медь, типовая металлизация на его основе не предназначена для применения в технологии flip-chip. Для преодоления этого ограничения в данной работе в качестве UBM под припойный шариковый вывод использовали платиновый stud-bump – первая точка сварки в сварном соединении методом «шарик-клин» при термозвуковом методе сварки (далее стад-бамп) с последующим нанесением на него припойного шарикового вывода.

Такой подход удобен для быстрого прототипирования и не требует применения фотошаблонов. Кроме того, использование платины объясняется ее физическими свойствами, а именно диффузионными (использование в качестве барьерных слоев), смачиваемостью припоями, инертностью (стойкость к окислению и коррозии), низким электрическим сопротивлением. Другими словами, платина более твердый материал, например, чем золото, и ее труднее деформировать, что играет положительную роль при использовании платины в качестве UBM [7, 8, 9].

Целью работы является рассмотрение технологических особенностей формирования платиновых стад-бампов методом термозвуковой сварки на алюминиевой металлизации контактных площадок кристалла и возможность применения этих особенностей для сборки ИС с использованием технологии flip-chip.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАТИНОВЫХ СТАД-БАМПОВ

Перед нанесением стад-бампов проводили плазменную очистку контактных площадок ИС от возможных загрязнений, затем на установке микросварки F&K Delvotec G5 формировали стад-бампы из платиновой проволоки $\phi 25$ мкм методом термозвуковой сварки, искрой электрического разряда [7]. Полученные образцы были исследованы с помощью растрового электронного микроскопа Jeol JSM 6610A (рис. 1).

Нанесение платиновых стад-бампов на установке термозвуковой проволочной микросварки может быть реализовано при условии выполнения двух модификаций стандартного процесса проволочной разварки.

Во-первых, установка проволочной разварки должна иметь программное обеспечение, разработанное специально для нанесения единичных шариковых выводов. Программное обеспечение убирает лишние движения сварочной головки, связанные с формированием траектории петли проволочных выводов и формированием второй точки сварки, так называемого рыбьего хвоста. Это позволяет фор-

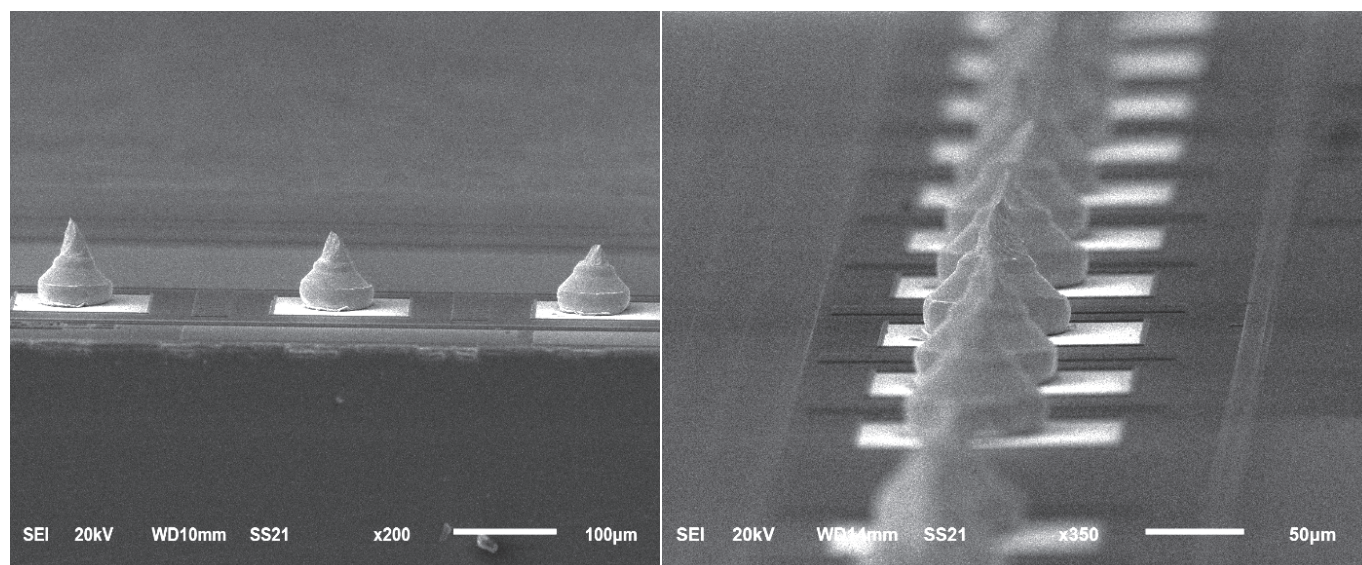


Рис. 1. Платиновые стад-бампы на алюминиевых контактных площадках кристалла

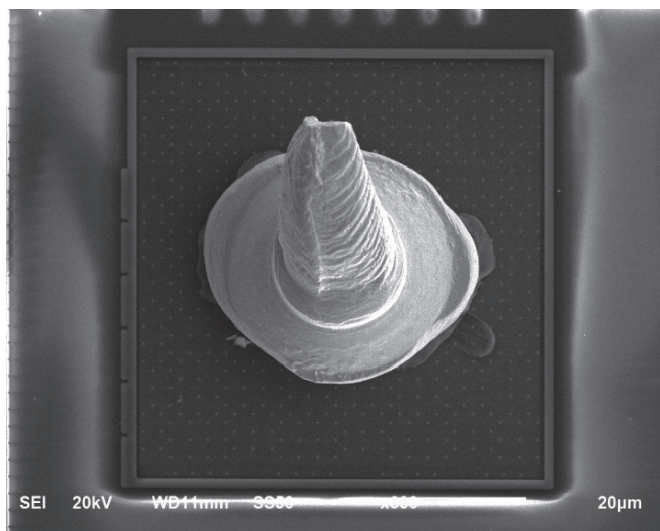


Рис. 2. Внешний вид стад-бампа после обрыва проволоки

мировать стад-бамп и приваривать его в пределах одной операции, что значительно сокращает время цикла приварки одного стад-бампа.

Во-вторых, необходимо использовать тонкую проволоку на основе специально разработанных под эту задачу сплавов. Контроль зоны температурного воздействия (HAZ – heat affected zone – рекристаллизованный сегмент проволоки, расположенный непосредственно над металлическим шариком) наиболее успешно осуществляется путем регулирования состава сплава проволоки [10, 11]. Стандартные сплавы проволоки для проволоочной разварки

имеют более низкую температуру рекристаллизации и соответственно более длинную зону температурного воздействия. Это увеличивает разброс места возможного обрыва проволоки, что влияет на длину кончика проволоки над стад-бампом и на повторяемость размеров и формы (рис. 2).

Слишком высокое место обрыва проволоки над шариком может привести к нехватке длины проволоки на противоположном оторванном конце для срабатывания электрода, создающего искру электрического разряда (EFO) [12], и стад-бамп следующей контактной площадке не сформируется. Максимальная растворимость алюминия в платине 16% (ат.) резко снижается и составляет ~3% при 500 °С. При комнатной температуре в платине растворяется 2,16% (по массе) алюминия. Сплавы, содержащие до 2% (по массе) алюминий, представляют собой твердые растворы [13, 14].

ПЛАНАРИЗАЦИЯ ПЛАТИНОВЫХ СТАД-БАМПОВ

Формирование стад-бампов на алюминиевых контактных площадках полупроводниковых кристаллов является первой частью двухстадийного процесса нанесения шариковых выводов для монтажа кристаллов методом flip-chip. Следующая стадия – планаризация сформированных стад-бампов чеканкой. Для выполнения данной операции использовалась установка формирования припойных шариковых выводов RasTech SB²-Jet.

Для чеканки платиновых стад-бампов использовался специально разработанный инструмент –

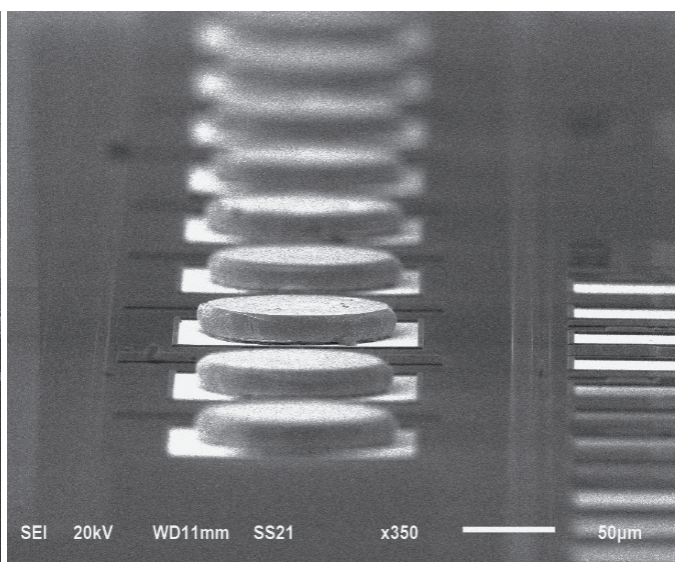
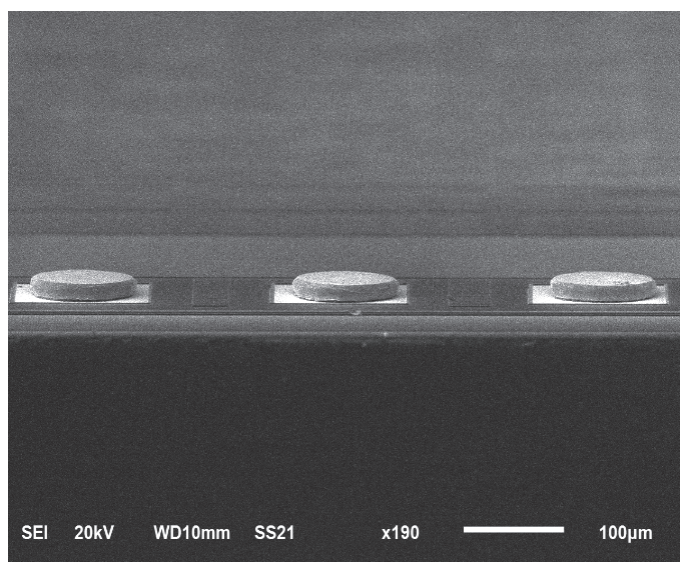


Рис. 3. Стад-бампы после операции планаризации

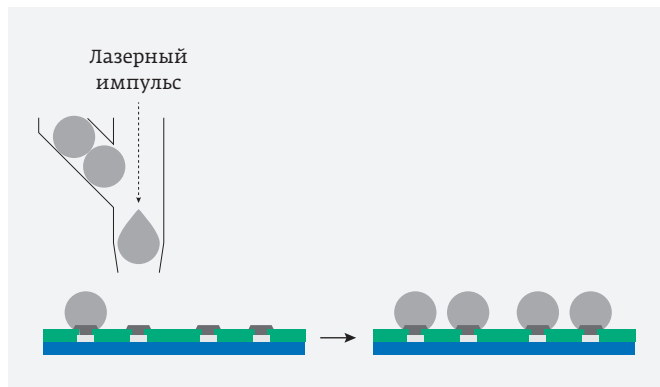


Рис. 4. Поочередное нанесение припойных шариков с одновременным оплавлением

Coining Capillary. Данный инструмент $\varnothing 100$ мкм с плоской поверхностью выполнен из сплава на основе карбида вольфрама с повышенной износостойкостью, твердостью и коррозионной стойкостью. Чеканка на заданную высоту позволила получить равномерную плоскую поверхность стад-бампов и, как следствие, избавиться от их разновысотности. На рис. 3 изображены платиновые стад-бампы после планаризации чеканкой.

Таким образом, планаризация стад-бампов обеспечила подготовленную поверхность для последующего применения ее в качестве металлизации под припойный шариковый вывод (UBM).

НАНЕСЕНИЕ ПРИПОЙНЫХ ШАРИКОВ

Планаризованные платиновые стад-бампы обеспечивают гладкую, смачиваемую припоем поверхность и главное – диффузионный барьер между припойным шариком и поверхностью алюминиевой контактной площадки.

Для нанесения припойных шариков на планаризованные платиновые стад-бампы использовали установку формирования припойных шариковых выводов RasTech SB²-Jet в режиме поочередного размещения припойных шариков с одновременным оплавлением лазером. Лазер оплавляет калиброванный шарик из припоя, например, SAC305 (Sn/Ag 3.0/Cu 0.5), пока он перемещается к контактной площадке кристалла (рис. 4).

Для применения данной технологии нанесение флюса на подложку не требуется. В этом режиме рабочая голова установки остается на постоянной фиксированной высоте над кристаллом. Припойный шарик $\varnothing 100$ мкм находится уже в расплавленном состоянии, когда он попадает на контактную

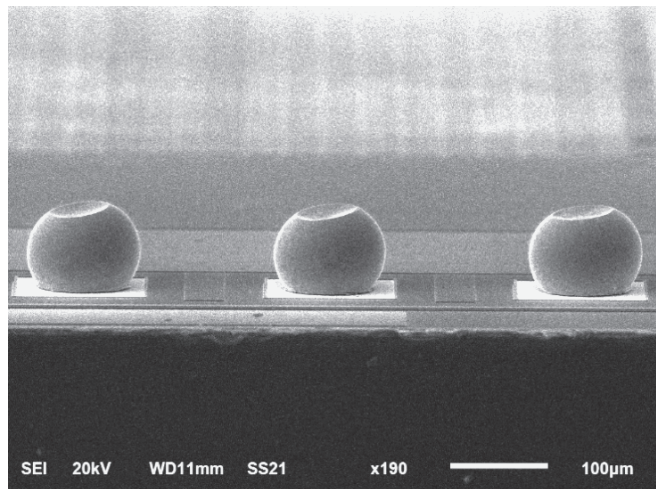


Рис. 5. Фрагмент кристалла с нанесенными припойными шариковыми выводами

площадку и остается в расплавленном состоянии до тех пор, пока не образуется соединение, необходимое для хорошей адгезии припойного шарика к контактной площадке. На стадии оплавления припой полностью смачивает поверхность планаризованного платинового стад-бампа. Таким образом, формируется припойный шариковый вывод с платиновым твердым ядром (рис. 5).

Анализ физико-механических свойств припойных сплавов показал, что наиболее технологическими свойствами обладают сплавы на основе олова SAC305 (Sn/Ag 3.0/Cu 0.5) и SAC105 (Sn/Ag 1.0/Cu 0.5). Эти сплавы являются бессвинцовыми в соответствии с требованиями законодательства об охране окружающей среды в виде директивы Совета Европы по экологической безопасности (RoHS – Restriction of use of Certain Hazardous Substances – ограничение на использование вредных веществ) [15] и имеют относительно низкую температуру плавления (221 °C и 226 °C соответственно).

Вышеприведенные сплавы Sn-Ag-Cu достаточно хорошо зарекомендовали себя при пайке изделий микроэлектроники. Заслуживает внимания припой состава (вес.%) 87-89Sn/9-11Bi/0,8-1,2Sb [16]. Данный сплав возможно использовать при нанесении припойных шариков на платиновые стад-бампы ввиду хороших технологических свойств (вес.%): 87-89 олова обеспечивает высокий коэффициент теплопроводности и хорошую смачиваемость платинового стад-бампа; 9-11 висмута повышает температуру плавления припоя до 230 - 240 °C; 0,8-1,2 сурьмы улучшает сопротивление сплава термической усталости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты показывают возможность использования в технологии flip-chip кристаллов с алюминиевой металлизацией. Предлагается на контактных площадках кристалла формировать стад-бампы из платиновой проволоки методом термозвуковой сварки. После планаризации стад-бампов наносить шарики припоя для последующего монтажа кристалла на подложку (корпус). Рассмотрены технологические особенности формирования платиновых стад-бампов методом термозвуковой сварки на алюминиевой металлизации контактных площадок. Проанализирована схема процесса нанесения припойных шариков на платиновые стад-бампы для сборки ИС с использованием технологии flip-chip.

Использование платиновых стад-бампов с припойными шариками на алюминиевой металлизации кремниевых кристаллов по технологии flip-chip дает возможность быстрого прототипирования изделий без применения шаблонов, как следствие – снижает себестоимость производства на стадии создания опытных образцов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент А 2016132921 RU, МПК Н 01 L 23/02. Способ изоляции при монтаже перевернутых кристаллов / Зенин В. В., Стоянов А. А., Колбенков А. А., Побединский В. В., Рогозин Н. В. (Научно-исследовательский институт электронной техники). № 2648311; Заявл. 09.08.2016 г. Оpubл. 23.03.2018 г. Бюл. № 5.
2. Патент А 2017144961 RU, МПК Н 01 L 21/321. Способ формирования шариковых выводов на алюминиевой металлизации контактных площадок кристалла / Зенин В. В., Рогозин Н. В., Побединский В. В. [и др.] (Научно-исследовательский институт электронной техники). Заявл. 20.12.2017 г. текущее состояние – экспертиза по существу.
3. **Nicewaner E.** Interconnect resistance characteristics of several flip-chip bumping and assembly techniques // *Microelectronics Reliability*. 1999. 39. PP. 113–121.
4. **Kang S. Y., Williams M. P., Lee Y. C.** Modeling and Experimental Studies on Thermosonic Flip-Chip Bonding // *IEEE Trans. On Components, Packaging, and Manufacturing Technology. Part B*. 1995. Vol. 18. № 4. PP. 728–733.
5. Bond Pad with multiple layer over pad metallization and method of formation: Patent No.: US12/705,021. Robert King, Pat Thomas, Assignee: Varughese Mathew. Filing Data: February 12, 2010.
6. Under-Bump metallization layers and electroplated solder bumping technology for flip-chip: Patent No.: US7,199,036 B2: Int. Cl. H01L 21/44. Chingho Philip Chan, Guowei David Xiao, Assignee: The Hong Kong University of Science and Technology. Prior Publication Data US2005/0014355 A1 Jan. 20, 2005.
7. Balancing cache capacity and on chip bandwidth via flexible exclusion. *SIGARCH Comput. Archit. News* (3): Будылин Ф. К., Полищук И. А., Слесарев М. В., Юрлин С. В. Опыт прототипирования микропроцессоров компании ЗАО «МЦСТ» // *Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ*. 2012. Вып. 3.
8. ГОСТ 13498–2010. Платина и сплавы на ее основе. Марки. – М.: Стандартинформ, 2012. 7 с.
9. **Васильева Е. В.** Платина, ее сплавы и композиционные материалы / Под ред. Васильевой Е. В. – М.: Металлургия, 1980. 296 с.
10. **Yang S. C., Chang W. C., Wang Y. W., and Kao C. R.** Interfacial reaction and Wetting Behavior Between Pt and Moiten Solder // *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*. 2009. Vol. 38. Is. 1. PP. 25–32.
11. **Levine L.** Kulicke&Soffa ind. Inc., Willow Grove, Pa, USA, «Ball bumping and coining operations for TAB and flip chip» // *Electronic Components and Technology Conference*, 1997. Proceedings. 47th, pp. 86–96.
12. **Mantese J. V., Alcini W. V.** Platinum Wire Wedge Bonding: A New IC And Microsensor Interconnect // *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*. 1988. Vol. 17. Is. 4. PP. 285–289.
13. **Савицкий Е. М.** Металловедение платиновых металлов. – М.: Металлургия, 1975. 424 с.
14. **McAlister A. J., Kahan D. J.** The Al-Pt (Aluminum-Platinum) System, *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. 1986. Vol. 7. No. 1. PP. 47–51.
15. **Шапиро Л.** Внедрение европейской директивы ROHS // *Электронные компоненты*. 2006. № 1. 9–12 с.
16. 2007140019/02 RU, МПК В 23 К 35/26, С 22 С 13/02. Бессвинцовый припой / Зенин В. В., Бокарев Д. И., Кастрюлев А. Н., Ткаченко А. С., Хишко О. В. (ФГБОУ ВО «ВГТУ»). № 2367551; Заявл. 29.10.2007 г. Оpubл. 20.09.2009 г. Бюл. № 26.

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА ОСВЕЩЕНИЯ В ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

► Е. Л. Харченко^{1, 2}, А. В. Кузовков², В. В. Иванов²

¹НИУ «МИЭТ»; ²АО «НИИМЭ»

С уменьшением минимальных размеров элементов интегральных схем растут возможности литографического оборудования, и для реализации передовых технологических уровней сегодня используются установки проекционной фотолитографии с возможностью произвольного конфигурирования источника освещения. Появление данного функционала в установках привело к возникновению задачи оптимизации геометрии источника освещения, решаемой в данной работе. В статье рассмотрены методы представления источника освещения в задачах оптимизации, приведен обзор алгоритмов решения, а также продемонстрирована оптимизация освещения с использованием генетического алгоритма.

ILLUMINATION SOURCE OPTIMIZATION METHOD IN PROJECTION PHOTOLITHOGRAPHY

E. L. Kharchenko^{1, 2}, A. V. Kuzovkov², V. V. Ivanov²

¹MIET; ²MERISC

The smaller minimal integrated circuit feature size becomes the more capabilities lithography equipment acquires. So for cutting edge technologies lithography tools with free form illumination sources are used. The function has led to optimization task origin for illumination geometry and the task is the subject of the work. Illumination source mathematical representation and optimization algorithms reviews are given in the article. Besides genetic algorithm usage for source geometry optimization is demonstrated.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, задача миниатюризации элементов интегральных схем остается актуальной на протяжении десятилетий, и успехи в ее решении напрямую связаны с развитием фотолитографии [1, 2]. Постоянное уменьшение воспроизводимых элементов происходит за счет совершенствования используемых материалов, технологических методов и оборудования. При этом для проекционной фотолитографии направление развития сегодня сместилось от уменьшения соотношения длины волны и апертуры к уменьшению технологического коэффициента k_1 в основном уравнении фотолитографии:

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA},$$

где CD – минимальный воспроизводимый размер элемента, k_1 – технологический коэффициент, λ –

длина волны экспонирующего излучения, NA – значение числовой апертуры.

Комплекс методов, обеспечивающих уменьшение k_1 , подразумевает внесение изменений в систему освещения, фотошаблон или параметры стека слоев на пластине. При этом по мере развития методов растет и сложность их математического обеспечения. Так, источник освещения установки проекционной фотолитографии при переходе от обычного круглого зрачка к аннулярной, квадрупольной и другим формам потребовал оптимизации двух или трех параметров вместо одного. Современные же установки имеют функцию настройки произвольной геометрии освещения [3, 4, 5], и число изменяемых параметров соответствует числу управляемых дифракционных оптических элементов – «пикселей» источника освещения. Таким образом, задача оптимизации источника приобретает иную форму и тре-

бует использования новых методов. Поиск решения этой задачи определяет цель данной работы.

Для разработки метода оптимизации были поставлены следующие задачи:

- определить математическую форму представления источника;
- определить критерий оптимизации;
- определить алгоритм оптимизации.

МЕТОД ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ОСВЕЩЕНИЯ

Способ математического представления источника в задаче оптимизации играет ключевую роль, поскольку определяет число варьируемых параметров, а значит, отражается на сложности алгоритма.

На рис. 1 показаны четыре метода представления источника [6, 7]: параметрический (I), пиксельный (II), контурный (III) и на основе базисных функций (IV).

Параметрический метод представления подразумевает описание источника в виде набора элементов с фиксированными внешним и внутренним радиусами, а также углом дуги [8]. Такой метод не позволяет использовать все возможности произвольного освещения в силу ограниченности доступного набора геометрических конфигураций.

Пиксельный метод напротив дает наибольшую гибкость, однако создает более высокую вычислительную нагрузку, поскольку большое количество пикселей требует соответствующего числа параметров для описания источника [9].

При использовании контурного метода [10] источник освещения представляется в виде двумерных срезов некоторой трехмерной поверхности. Данный подход предполагает описание источника с помощью одного параметра – положения плоскости среза. Такой подход не обеспечивает всех возможных конфигураций источника.

Метод представления источника на основе базисных функций предполагает вычисление распределения интенсивности источника как суперпозицию некоторых распределений (функций), имеющих разный вес. Коэффициенты перед функциями определяют вид источника и рассматриваются как его параметры. При правильном выборе используемого набора функций данный метод обеспечивает компромисс между числом параметров и пространством допустимых конфигураций, поэтому было принято решение использовать его для решения задачи оптимизации.

В качестве базисных функций для реализации метода были выбраны полиномы Цернике, широко

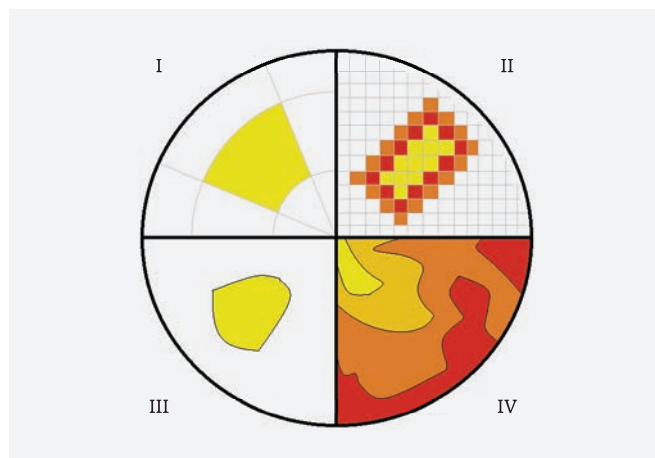


Рис. 1. Методы представления источника освещения

используемые в оптике [11]. Данный набор функций позволяет описать сложный рельеф в виде суперпозиции простых членов. При этом каждый полином включает в себя две составляющие:

- радиальную часть – показывает, количество пиков и их расстояние от центра зрачка;
- меридионально-частотную часть – определяет частоту повторения пиков и впадин.

$$Z_n^m(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \cos(m\varphi),$$

$$Z_n^{-m}(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \sin(m\varphi),$$

где n – это целое число, степень полинома, m – параметр угловой зависимости, $R_n^m(\rho)$ – радиальная часть, $\sin(m\varphi)$ или $\cos(m\varphi)$ – меридионально-частотная часть.

Складывая полиномы разных порядков и варьируя коэффициент перед каждым из них, можно получить источник освещения любой конфигурации [12].

КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Для обеспечения высокой производительности при обработке решения на различных тестовых структурах целесообразно связывать критерий оптимизации с воздушным изображением. Привычным параметром качества воздушного изображения является его контраст, однако в суб-100 нм технологиях более качественную оценку дает параметр NILS (Normalized Image Log-Slope). Данный параметр характеризует наклон кривой интенсивности воздушного изображения (рис. 2), что, в конечном счете, отражается на формировании стенки фоторезиста.

Кроме того, большое значение имеет глубина фокуса. При отклонениях фокальной плоскости от

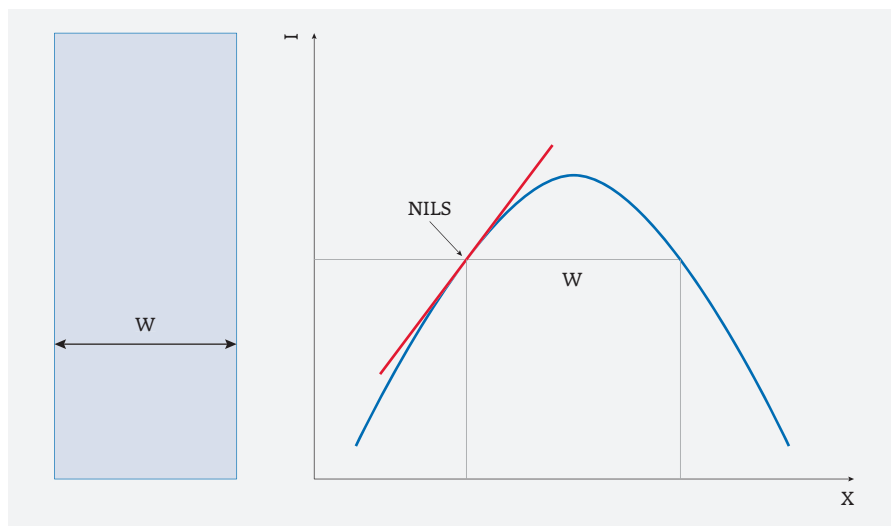


Рис. 2. Распределение интенсивности света на линии с шириной w

требуемого уровня, изображение может быть сформировано некорректно, поэтому важно учесть зависимость измеряемого параметра от фокуса.

В итоге, критерий оптимизации определяется выражением:

$$B = \frac{1}{\sum_i NILS_i},$$

где $NILS_i$ – значение $NILS$ при i -м положении фокальной плоскости.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ

На сегодняшний день существует множество алгоритмов оптимизации и укрупненно их можно разбить на два класса: градиентные и алгоритмы прямого поиска. Градиентные алгоритмы обладают большей скоростью сходимости, однако в рамках нашей задачи не всегда представляется возможным рассчитать производную критерия оптимизации. В связи с этим необходимо рассмотреть алгоритмы без вычисления производной [13].

Алгоритмы, которые для выбора точки очередного расчета используют информацию только о значении самой функции, а не ее производной, называются алгоритмами прямого поиска [14]. Наиболее простые

из них реализуют метод покоординатного спуска. В этом случае задача оптимизации сводится к поочередному изменению переменных вдоль одной из координатных осей. Шаг спуска может быть как постоянным, так и переменным (например, релаксационный метод Гаусса – Зейделя). Такие алгоритмы не подходят для минимизации функций имеющих овраг, дно которого не ориентировано вдоль какой-то из координатных осей. Для этих целей служит алгоритм, включающий две операции: пробное движение в Δ -окрестности текущей точки и движение в допустимом

направлении. Подобный метод следует использовать в решаемой задаче, поскольку искомым критерий оптимизации не задан в явном виде, зависит от большого числа переменных, а вычисление его производной трудоемко и не всегда возможно. Удобным средством оптимизации подобного рода является генетический алгоритм [15], относящийся к алгоритмам прямого поиска. Подробное описание генетических алгоритмов приведено в [16], здесь ограничимся описанием основных этапов.

Работа генетического алгоритма заключается в подборе случайных комбинаций необходимых параметров с использованием механизмов, схожих по своей сути с естественным отбором, таких как наследование, селекция и скрещива-

Таблица 1. Параметры моделирования

№	Параметр	Значение
1	Длина волны, λ	193 нм
2	Числовая апертура, NA	0,75
3	Толщина резиста, h	300 нм
4	Коэффициент преломления резиста, n_r	1,68
5	Коэффициент поглощения резиста, k_r	-0,03
6	Коэффициент преломления подложки, n_s	1,79
7	Коэффициент поглощения подложки, k_s	-0,397
8	Положение фокальной плоскости, BF	40 нм, 70 нм, 100 нм

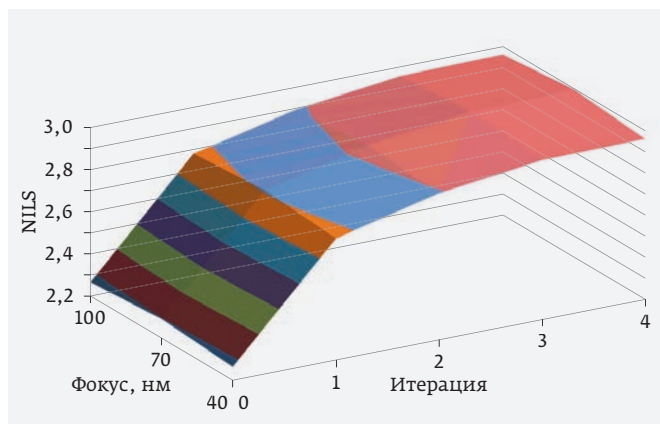


Рис. 3. График зависимости параметра NLS от положения фокальной плоскости и итерации генетического алгоритма

ние. В классическом представлении решение задачи оптимизации необходимо представить в виде «генотипа», то есть вектора генов. В данной работе в качестве «генотипа» выступает набор коэффициентов полинома Цернике, описывающий источник освещения.

На первом этапе получают случайный набор коэффициентов c_i , определяющий исходный источник и измеряют значение критерия оптимизации для него. Далее изменяют каждый коэффи-

циент в пределах некоторого интервала варьирования, фиксируя значения остальных коэффициентов. Для каждого нового набора коэффициентов c_i^* определяют значение целевой функции и по окончании первого этапа получают набор источников освещения (первое поколение) и соответствующие им значения критерия оптимизации.

На следующем этапе производится отбор особей из первого поколения, имеющих наименьшие значения целевой функции или, другими словами, наибольшие значения NLS. Здесь необходимо отобрать все векторы с измененными коэффициентами c_i^* , которые показали результат лучше исходного. Из источников, отобранных на этом этапе, собирают измененные значения коэффициентов c_i^* и заменяют ими соответствующие значения в исходном источнике. У полученного источника измеряют критерий оптимизации.

Полученный таким образом источник освещения принимается за исходный для следующей итерации, и все действия повторяются снова. Данный набор действий необходимо проводить многократно, пока не будет выполнен критерий остановки алгоритма. В рамках данной задачи таким критерием является уменьшение прироста NLS на порядок по сравнению с начальным приростом.

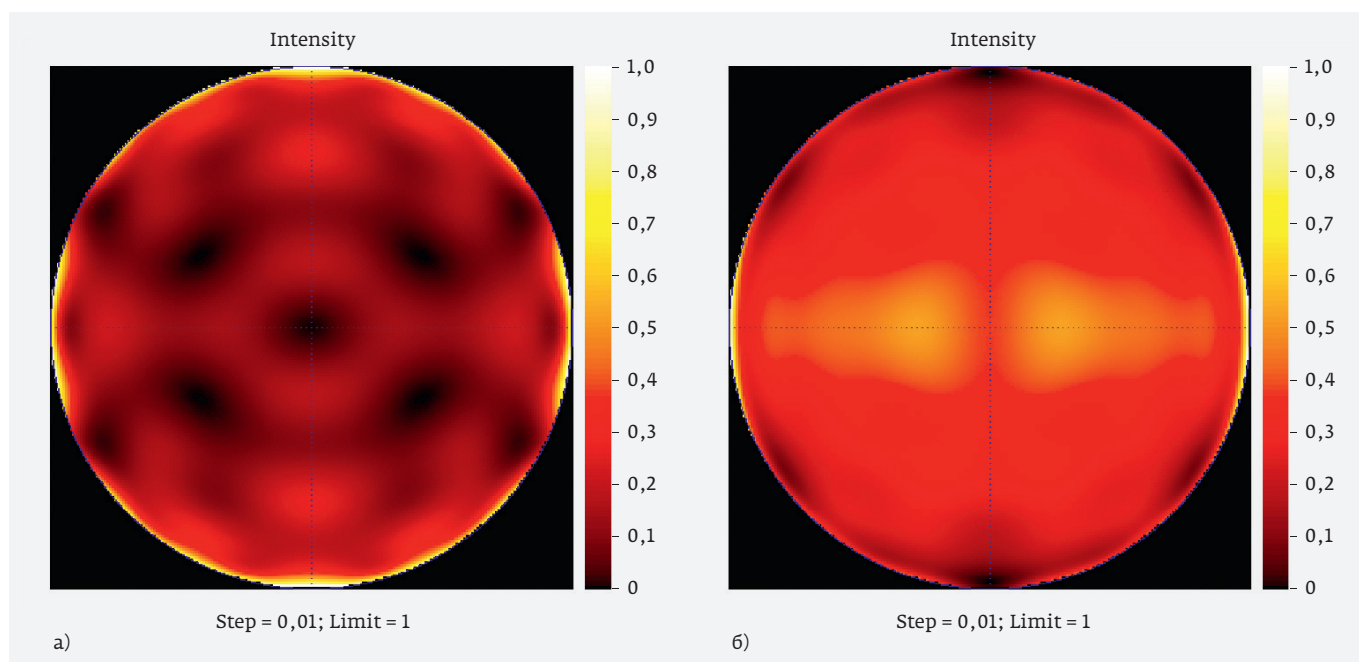


Рис. 4. Карта распределения интенсивности света: а) для исходного источника, б) для источника после оптимизации

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТ

Моделирование воздушного изображения для вычисления NILS проводилось в САПР Mentor Graphics Calibre. Метод оптимизации прорабатывался на тестовой структуре в виде изолированной линии шириной 90 нм. Параметры оптической модели приведены в табл. 1.

Исходный источник был подобран случайным образом. Для его моделирования использовались первые 37 полиномов Цернике. В ходе работы были проведены четыре итерации генетического алгоритма, в результате которых получено увеличение параметра NILS на 31,9% (рис. 3). При этом разброс значений NILS в зависимости от положения фокальной плоскости не превышает 1%. На рис. 4 показан вид исходного источника и полученного в результате оптимизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ методов представления источника освещения показал, что наиболее удачным является представление на основе базисных функций, поскольку обеспечивает компромисс между вычислительной сложностью и числом доступных конфигураций источника.

Для решения задачи следует использовать алгоритмы прямого поиска, поскольку искомым критерий оптимизации не может быть задан в явном виде, зависит от большого числа переменных, а вычисление его производной не всегда возможно. Применение генетического алгоритма для оптимизации источника позволило увеличить NILS на 31% за четыре итерации.

Открытым в данной задаче остается вопрос о геометрии топологических структур для оптимизации источника освещения. Решение этого вопроса определяет дальнейший вектор работы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Красников Г.Я., Горнев Е.С.** Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон», история отечественной электроники. В 2-х т. – М., 2012.
2. **Kwok-Kit Wong A.** Optical Imaging in Projection Microlithography, ISBN: 9780819458292, p. 276, (2005) doi: 10.1117/3.612961.ch1.
3. **Bekaert J., Laenensa B., Verhaegena S., Van Looka L., Trivkovic D., Lazzarino F., Vandenberghe G., van Adrichemb P., Sochab R., Baronb S., Tsaib M. C., Ningb K., Hsub S., Liub H. Y., Mulderc M., Boumac A., van der Heijdenc E., Mouraillec O., Schreelc K., Findersc J., Dusac M., Zimmermann J., Gräupnerd P., Neumann J. T., Hennerkesd C.** Freeform illumination sources: An experimental study of source-mask optimization for 22 nm SRAM cells. Proc. SPIE7640, P. 29 Optical Microlithography XXII, (February 23, 2010); doi:10.1117/12.846918.
4. **Stagaman G. J., Eakin R. J., Sardella J. C., Johnson J. R., Spinner C. R.** Effects of complex illumination on lithography performance, Proc. SPIE2726, Optical Microlithography IX, (7 June 1996); doi: 10.1117/12.240958.
5. **Tomoyuki Matsuyama, Naonori Kita, Ryota Matsui, Junji Ikeda.** Application of illumination pupilgram control method with freeform illumination, Proc. SPIE8326, Optical Microlithography XXV, 83260K (13 March 2012); doi: 10.1117/12.916594.
6. **Herkommer A. M.** Evolution of illumination systems in microlithography: a retrospective, Proc. SPIE7652, International Optical Design Conference 2010, 76520X (9 September 2010); doi: 10.1117/12.870738.
7. **Smith B. W.** The saga of sigma: influences of illumination throughout optical generations, Proc. SPIE9052, Optical Microlithography XXVII, 905204 (4 April 2014); doi: 10.1117/12.2048827.
8. **Yasushi Mizuno, Tomoyuki Matsuyama, Soichi Owa, Osamu Tanitsu, Naonori Kita, Masahiko Okumura.** Illumination optics for source-mask optimization, Proc. SPIE7640, Optical Microlithography XXIII, 76401I (10 March 2010); doi: 10.1117/12.846476.
9. **Jia N. and Lam E. Y.** Pixelated source mask optimization for process robustness in optical lithography, Opt. Express 19, 19384–19398 (2011) doi:10.1364/OE.19.019384.
10. **Tolani, Vikram & Hu, Peter & Peng, Danping & Cecil, Tom & Sinn, Robert & Pang, Linyong & Gleason.** BobSource-mask co-optimization (SMO) using level set methods. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. (2009). 7488. doi:10.1117/12.833430.
11. **Wu X., Liu S., Li J., Lam E. Y.** Efficient source mask optimization with Zernike polynomial functions for source representation, J. Opt.

- Express. Vol. 22. No. 4. P. 3924–3937 (2014); doi:10.1364/OE.22.003924.
12. **Bezdidko S. N.** Study of the properties of Zernike's orthogonal poly-nomials, Proc. SPIE5174, Novel Optical Systems Design and Optimization VI, (6 November 2003); doi: 10.1117/12.507927.
13. **Lv W., Liu S., Wu X. and Lam E. Y.** Illumination source optimization in optical lithography via derivative-free optimization // Journal of the Optical Society of America A. 2014. Vol. 31. P. B19; doi:10.1364/JOSAA.31.000B19.
14. **Conn R., Scheinberg K., Vicente L.N.** Introduction to Derivative-Free Optimization. MOS/SIAM Series on Optimization. Vol. 8. SIAM, Philadelphia, MA (2009); doi:10.1137/1.9780898718768.ch8.
15. **Fühner T., Evanschitzky P., and Erdmann A.** Mutual source, mask and projector pupil optimization, Proc. SPIE8326, 83260I (2012); doi:10.1117/12.916529.
16. **Habib Y., Sadiq M. Sait, Hakim Adiche.** Evolutionary algorithms, simulated annealing, and Tabu search: a comparative study, Proc. SPIE3455, Applications and Science of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Evolutionary Computation, (13 October 1998); doi: 10.1117/12.326701.

ПОЛЕВАЯ ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ МНОГООСТРИЙНЫХ КРЕМНИЕВЫХ КАТОДНЫХ МАТРИЦ

► Г. Я. Красников¹, Е. С. Горнев¹, С. Н. Орлов¹, Р. К. Яфаров², А. Р. Яфаров², С. П. Тимошенко³, В. П. Тимошенко³

¹АО «НИИМЭ», ²СФ ИРЭ РАН, ³НИУ «МИЭТ»

Исследовано влияние плазмохимической модификации поверхности на автоэмиссионные свойства кристаллов кремния дырочного типа проводимости. Показано, что применение фторуглеродной плазмы при структурировании поверхности кристаллов кремния с использованием углеродного масочного покрытия позволяет получать заданные токи автоэмиссии при различных напряженностях внешних электрических полей независимо от коэффициентов усиления поля эмиссионных выступов. Рассмотрены физико-химические механизмы, ответственные за модификацию автоэмиссионных характеристик кристаллов кремния.

FIELD EMISSION OF ELECTRONS OF MULTI-TIP CATHODE MATRICES ON P-TYPE SILICON CRYSTALS

G. Ya Krasnikov¹, E. S. Gornev¹, S. N. Orlov¹, R. K. Yafarov², A. R. Yafarov², S. P. Timoshenkov³, V. P. Timoshenkov³

¹MERI SC, ²IRE RAS, ³NRU MIET

The influence of the plasma-chemical modification of the surface on the autoemission properties of the p-type silicon crystals of silicon is investigated. It is shown that the use of fluorocarbon plasmas during the structuring of the surface of silicon crystals using a carbon mask coating allows one to obtain given autoemission currents at various intensities of external electric fields, regardless of the amplification factors of the field of emission protrusions. The physicochemical mechanisms responsible for the modification of field emission characteristics of silicon crystals are considered.

Основными недостатками, которые препятствуют широкому использованию кристаллического кремния при создании активной элементной базы вакуумно-плазменной микроэлектроники, являются высокие напряжения электрических полей, необходимые для управления процессом автоэмиссии, а также небольшие максимальные плотности автоэмиссионных токов. В настоящее время уменьшение рабочих управляющих напряжений и повышение плотностей автоэмиссионных токов достигается, в основном, в результате совершенствования электровакуумных технологий твердотельной микро- и нанoeлектроники и перехода к устройствам со сверхмалыми размерами. Наиболее значительные успехи в этой области получены при создании на

кремнии острых решеток автоэмиссионных катодов с радиусом кривизны атомарных размеров (менее 1nm) [1]. Это позволяет существенно понизить рабочие напряжения и увеличить плотности автоэмиссионных токов за счет повышения поверхностной плотности острий. Однако использование высокоаспектных эмиттеров, а также различных конструктивных решений, направленных на повышение фактора усиления поля K путем уменьшения радиусов эмитирующих острий, диаметров отверстий в управляющих электродах или создания нанолезвийных планарных структур, приводит к усложнению технологии изготовления и сопровождается, как правило, снижением надежности и увеличением себестоимости автоэмиссионных устройств. В связи с этим большой как фундаментальный, так

и прикладной интерес представляют исследования альтернативных путей, направленных на повышение воспроизводимости и улучшение эмиссионных характеристик автокатодов, которые были бы связаны не только с конструктивными, но и с физико-химическими модификациями эмитирующих поверхностей кремниевых кристаллов.

В работе [2] показано, что плазмохимическая обработка поверхностей полупроводников с использованием различных химически активных газовых сред может вызывать устойчивую модификацию их электронных свойств. Модификация поверхностей проявляется, прежде всего, в ослаблении явлений, связанных с использованием эффектов поля, люминесценции, фото- и поверхностной проводимости, в изменении работы выхода и др. [3]. Однако, с другой стороны, она может позволить в определенной степени активно формировать электронные свойства поверхности обрабатываемых полупроводниковых кристаллов и придавать им необходимые функциональные свойства.

Цель работы – исследования влияния плазмохимической модификации электронных свойств поверхностей на автоэмиссионные свойства полевых источников электронов, изготовленных на основе поверхностно наноструктурированных кристаллов кремния.

Исследования проводились с использованием кристаллов кремния дырочного типа проводимости с удельным сопротивлением $0,01-0,02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Структурирование поверхностей осуществлялось в одном технологическом цикле осаждением остров-

ковых углеродных масочных покрытий в микроволновой плазме паров этанола после удаления естественного оксидного покрытия в низкоэнергетичной плазме хладона-14 и последующего высокоанизотропного плазмохимического травления по методике, изложенной в [4]. Наноморфология поверхностей изучалась с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа Solver-P-47. В качестве зонда использовались стандартные кремниевые кантилеверы CSG10 пирамидальной формы с радиусом закругления 10 нм и жесткостью $0,1 \text{ Н/м}$. Поле сканирования составляло $3 \times 3 \text{ мкм}$. Обработка результатов измерений производилась с использованием программного обеспечения микроскопа. Исследования автоэмиссионных свойств кремниевых пластин осуществлялись в условиях высокого вакуума (10^{-5} Па) на диодной структуре, способной изменять расстояние между электродами с точностью до 1 мкм .

На рис. 1, 2 приведены экспериментальные зависимости параметров наноморфологий, напряженностей электрических полей полевой эмиссии электронов, обеспечивающих плотности автоэмиссионного тока 50 мкА/см^2 , а также максимальных плотностей автоэмиссионных токов от длительностей высокоанизотропного масочного травления (значениям координат при $t=0 \text{ с}$ соответствуют морфологические и автоэмиссионные характеристики кремниевых пластин до проведения масочного травления). Видно, что с увеличением длительностей высокоанизотропного плазмохимического травления высоты выступов имеют максимумы при длительно-

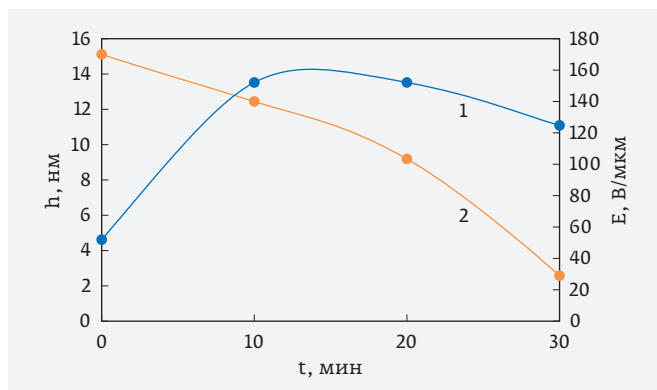


Рис. 1. Зависимости высот выступов (1) и напряженностей электрического поля полевой эмиссии электронов при плотности автоэмиссионного тока 50 мкА/см^2 (2) от длительности масочного травления пластин кремния (100) р-типа при травлении оксидного покрытия в плазме хладона-14

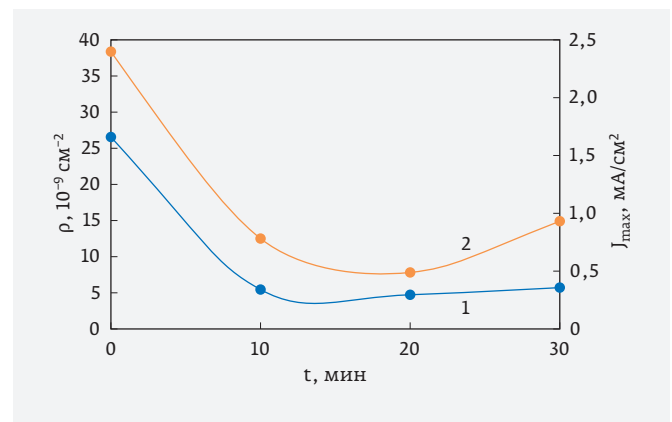


Рис. 2. Зависимости поверхностных плотностей выступов (1) и плотностей максимальных токов автоэмиссии (2) от длительности масочного травления кремния р-типа при травлении оксидного покрытия в плазме хладона-14

сти около 10 мин. Высоты в максимумах составляют 14 нм. При дальнейшем увеличении длительностей масочного травления высоты выступов незначительно уменьшаются. Их поверхностные плотности после 10 мин высокоанизотропного масочного травления выходят на насыщение и в дальнейшем имеют практически одинаковые значения, которые составляют $(5-7) \cdot 10^9 \text{ см}^2$.

В интервале длительностей масочного травления от 0 до 30 мин наблюдается больше чем пятикратное монотонное уменьшение напряженностей полей автоэмиссии, при которых плотность автоэмиссионного тока остается неизменной и равной 50 мкА/см^2 . Причем уменьшение напряженностей электрических полей происходит независимо от характера изменения высот выступов (рис. 1). Характер изменения максимальных плотностей автоэмиссионных токов в целом коррелирует с характером изменения поверхностных плотностей автоэмиссионных выступов (рис. 2). Отличие состоит лишь в том, что при длительностях масочного травления больше 20 мин наблюдается небольшое увеличение максимальных плотностей тока, в то время как поверхностная плотность выступов остается на прежнем уровне. В отсутствие масочного травления реализуются наибольшая напряженность внешнего электрического поля для обеспечения фиксированной плотности автоэмиссионного тока 50 мкА/см^2 (рис. 1, кривая 2), а также максимальная плотность автоэмиссионного тока, которая более чем на порядок превышает заданную фиксированную плотность тока (рис. 2, кривая 2). Характеры изменения напряженностей внешних электрических полей для обеспечения фиксированной плотности автоэмиссионного тока 50 мкА/см^2 , а также максимальных плотностей автоэмиссионных токов, при превышении которых происходят разрушения автокатодов, могут свидетельствовать о том, что их взаимосвязь, вероятнее всего, не является основной причиной разрушения полевой многоострийной катодной матрицы, изготовленной на кристаллах кремния дырочного типа проводимости.

В настоящее время единственным аналитическим выражением, описывающим туннельную эмиссию электронов при приложении сильных электрических полей, является формула Фаулера и Нордхейма, которая хорошо описывает автоэлектронную эмиссию из металлов в вакуум [5, 6]:

$$J = A \frac{E_i^2}{\phi} \cdot \exp\left(\frac{-B\phi^{3/2}}{E_i}\right), \quad (1)$$

где A , B – некоторые коэффициенты, ϕ – потенциал работы выхода электрона из материала катода, E_i – электрическое поле на отдельном (усредненном) микровыступе катодной структуры. Электрическое поле на микровыступе связано со средней величиной напряженности внешнего электрического поля E_0 через коэффициент усиления поля K , который определяется морфологией поверхности:

$$E_i = K \cdot E_0. \quad (2)$$

Таким образом, окончательный вид аналитического выражения зависимости $j(E)$ (1) примет вид:

$$J = A \cdot \frac{(E_0 \cdot K)^2}{\phi} \cdot \exp\left(\frac{-B\phi^{3/2}}{E_0 \cdot K}\right). \quad (3)$$

Рост плотности тока с повышением напряженности внешнего электрического поля E_0 заканчивается в металлах при $j = 10^8 - 10^{10} \text{ А/см}^2$ вакуумным пробоем и гибелью эмиттера. Этому предшествует более интенсивная, но кратковременная взрывная электронная эмиссия.

Согласно выражению (3), уменьшение напряженности внешнего электрического поля на отдельных выступах E_i , при котором плотность автоэмиссионного тока остается фиксированной, возможно только при увеличении коэффициента усиления поля K таким образом, чтобы произведение $K \cdot E_0$ оставалось постоянным. Однако из зависимостей, приведенных на рис. 1, 2 хорошо видно, что поверхностные плотности выступов при длительностях травления больше 10 мин остаются практически неизменными, а их высоты и, следовательно, коэффициенты усиления поля на них уменьшаются. Оценки с использованием выражения (3) свидетельствуют, что полученные закономерности изменения морфологических и автоэмиссионных характеристик поверхностно структурированных кремниевых пластин не могут быть интерпретированы в рамках закона Фаулера – Нордхейма.

При ионно-плазменном травлении кремния в среде CF_4 химически активными частицами являются ионы C^+ , CF_n^+ , где $n=1...4$, а также радикалы CF_n и нейтральные атомы фтора. При хемосорбции они образуют на кремнии монослойные адкомплексы Si-C , Si-F и Si-C-F [7], которые имеют сильные энергии химической связи (4,55, 5,6 и 5,64 eV, соответственно) и превышают энергию химической связи между атомами в кремнии. После удаления естественного оксидного покрытия эти соединения пассивируют атомно-чистую поверхность

кремния. Благодаря более высокой по отношению к кремнию и углероду электроотрицательности атомарного фтора на поверхности кристаллического кремния при этом индуцируется отрицательный заряд. Непосредственно на границе кремния Si-F и C-F комплексы ориентированы перпендикулярно поверхности раздела, придавая поверхности некоторый суммарный дипольный момент. Для перемещения электрона через образовавшийся дипольный слой необходимо совершить дополнительную работу. Это приводит к росту работы выхода по сравнению с атомно-чистой поверхностью кремния [3].

При осаждении островкового субмонослойного углеродного масочного покрытия из плазмы паров этанола, которое осуществляется при отрицательном смещении на подложке благодаря низкой энергии C-C химической связи (2,74 эВ), наиболее вероятным является формирование Si-C-C...C и C-C-C...C цепочечных комплексов. В процессе осаждения они «замуровывают» оставшиеся после плазмохимического травления кремния полярные Si-F и C-F комплексы, а также различные дефекты упаковки углеродного покрытия. С увеличением толщины покрытия разориентация диполей увеличивается, а суммарный дипольный момент поверхности уменьшается [3].

Полевая эмиссия электронов в кремниевых структурах с масочным покрытием осуществляется в процессе двухступенчатого туннелирования из кремния через карбид-кремниевый диэлектрический барьер во фторуглеродную поверхностную фазу и затем в вакуум. Электроны, туннелирующие из кремниевой подложки в островковый Si-CF_m поверхностный слой, могут взаимодействовать с дефектами, расположенными в его объеме. Захват электронов ловушечными центрами масочного покрытия приводит к дополнительному увеличению напряженности поля автоэмиссии. Поэтому ее величина зависит от толщины слоя фторуглеродной поверхностной фазы. При максимальной толщине покрытия, которая имеет место в отсутствие масочного травления, это выражается в максимальной напряженности поля анода для получения заданной плотности автоэмиссионного тока.

При высокоанизотропном травлении кремния через фторуглеродосодержащую маску за счет ограниченной селективности травления одновременно с увеличением высоты выступов происходит постепенное уменьшение толщины маски. При длительностях травления больше 10 мин высоты выступов начинают уменьшаться за счет ускоренного травления заостренных вершин (рис. 1, кривые 1).

Уменьшение толщин масочных покрытий приводит к уменьшению поперечного сопротивления покрытия маски, величины встроенного в толщину маски пространственного заряда, а также при удалении Si-F и C-F диполей отрицательного дипольного момента поверхности. Это способствует быстрому уменьшению напряженности поля полевой эмиссии при заданной плотности автоэмиссионного тока (рис. 1, кривая 2).

Влияние изменения толщины масочного покрытия на максимальные плотности автоэмиссионных токов, при превышении которых происходит разрушение катодной матрицы, заключается в следующем [8, 9]. При двухступенчатом туннелировании поверхностный потенциал на кремниевых выступах, являющихся источниками электронов, определяется разностью между потенциалом анода и суммарным падением напряжения на вакуумном промежутке анод-масочное покрытие и падением напряжения при прохождении электронов через толщину маски. Этот потенциал на границе углеродного масочного покрытия и кремниевых выступов должен обеспечить туннелирование электронов из кремниевых выступов в маску. Так как потенциал в приповерхностной области кремния является положительным, а матрица кремния выполняет роль катода, то для кристаллов дырочного типа проводимости реализуется обратное включение полупроводника. При этом на границе «кремниевый выступ – фторуглеродная маска» формируется конденсатор, емкость которого зависит от величины обедненной области в полупроводнике.

В отсутствие высокоанизотропного травления суммарное падение напряжения при автоэмиссии на участке «анод – поверхность кремниевых выступов» является максимальным, а положительный потенциал на поверхности кремниевых выступов и ширина обедненной области объемного заряда на границе «кремниевый выступ – фторуглеродная маска» становятся минимальными. Это улучшает условия для туннелирования электронов из кремниевой матрицы [10, 11]. Благодаря этому, при высокой напряженности внешнего электрического поля обеспечивается в отсутствие масочного травления максимальная плотность автоэмиссионного тока.

При уменьшении толщины маски и связанного с ней падения напряжения на границе кристалла кремния с маской увеличиваются поверхностный потенциал и ширина обедненной области объемного заряда. Это уменьшает проводимость контактной области и увеличивает величину потенциалъ-

ного барьера для туннелирования электронов. Для увеличения автоэмиссионного тока в этих условиях необходимо увеличивать анодное напряжение, которое сопровождается увеличением на границе кремния поверхностного потенциала. Однако увеличение последнего, с одновременным уменьшением проводимости контактной области, может происходить только до тех пор пока разность потенциалов от накопившегося по разные стороны границы контакта заряда не превысит напряжение электрического пробоя конденсатора, в котором диэлектриком является граница между оставшейся частью масочного покрытия и поверхностью кристалла кремния. Результатом пробоя является разрушение эмиссионных центров и выход катодной матрицы из строя.

При больших длительностях масочного травления в связи с удалением с поверхности кремния электроотрицательных фторуглеродных диполей работа выхода электронов уменьшается, а прозрачность потенциального барьера для эмиссии электронов увеличивается. Благодаря переходу к однотуннельному транспорту это приводит к одновременному и ускоренному уменьшению напряженности поля для получения заданного тока автоэмиссии и увеличению его максимальной плотности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10033).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Marcus R. B., Ravi T. S., Gmitter T. et al.** Formation of silicon tips with < 1 nm radius // *Applied Physics Letters*. 1990 (15 January). Vol. 56. № 3. P. 236–238.
2. **Яфаров Р. К.** Формирование встроенного потенциала в кристаллах кремния (100) при СВЧ плазменной микрообработке // *Физика и техника полупроводников*. 2014. Т. 48. Вып. 4. С. 529–534.
3. **Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А. и др.** Введение в физику поверхности. – М.: Наука, 2006. 490 с.
4. **Яфаров Р. К., Шаныгин В. Я.** Поверхностное наноструктурирование в системе углерод-кремний (100) при микроволновой плазменной обработке // *Физика и техника полупроводников*. 2017. Т. 51. Вып. 4. С. 558–562.
5. **Fowler R. H., Nordheim L. W.** Proc. R. Soc. London. A. 1928. Vol. 119. P. 173.
6. **Усанов Д. А., Яфаров Р. К.** Методы получения и исследования самоорганизующихся наноструктур на основе кремния и углерода. – Саратов: Саратов. гос. ун-т, 2011. 126 с.
7. **Яфаров Р. К.** Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. – М.: Физматлит, 2009. 216 с.
8. **Yafarov R. K., Gornev E. S., Orlov S. N., Timoshenkov S. P., Timoshenkov V. P., Timoshenkov A. S.** Formation of field-emission emitters by microwave plasma-chemical synthesis of nanocarbon structures // *Semiconductors*. 2016. Т. 50. № 13. С. 1726–1728.
9. **Красников Г. Я., Горнев Е. С., Орлов С. Н., Яфаров Р. К., Яфаров А. Р. и др.** Способ повышения плотности тока и деградационной стойкости автоэмиссионных катодов на кремниевых пластинах. Патент на изобретение РФ № 2016124771 от 22.06.2016. Дата публикации 27.12.2017. Бюл. 36.
10. **Давидович М. В., Яфаров Р. К.** Автоэмиссионная шахматная структура на основе алмазографитовых кластеров // *Журнал технической физики*. 2018. Т. 88. Вып. 2. С. 283–293.
11. **Зайцев Н., Горнев Е., Орлов С., Красников А., Свечкарев К., Яфаров Р.** Наноалмазографитовые автоэммиттеры для интегральных автоэмиссионных элементов // *НАНОИНДУСТРИЯ*. 2011. № 5 (29). С. 36–39.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОМЕХАНИКИ И АКУСТОЭЛЕКТРОНИКИ

► Е. М. Бакулин¹, Г. В. Курушин², К. А. Строганов¹

¹ОАО «Авангард», ²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Приведены результаты моделирования конструкции чувствительного элемента микроакселерометра в части размеров инерционной массы и гибкого подвеса с ПАВ-топологией. Расчетно-аналитическим методом и методом математического моделирования в среде COMSOL Multiphysics определены оптимальные размеры и форма элементов конструкции для заданной номинальной нагрузки в 5g. Показано, что добиться равномерного изгиба подвеса можно, используя конструкцию переменной ширины / толщины.

RESULTS OF SIMULATION OF THE MICROACCELEROMETER DESIGN BASED ON INTEGRATED TECHNOLOGY OF MICROMECHANICS AND ACOUSTOELECTRONICS

E. M. Bakulin¹, G. V. Kurushin², K. A. Stroganov³

¹Avangard JSC, ²SPbETU

The results of simulation of design of microaccelerometer in terms of the dimensions of the inertial mass and flexible balk with a SAW topology are presented. Calculation-analytical method and mathematical modeling method in the COMSOL Multiphysics environment determined the optimal sizes and shape of the structural elements of the sensor for a specified nominal load of 5g. It is shown that it is possible to achieve uniform bending of the balk using a variable width / thickness construction.

ВВЕДЕНИЕ

Интеграция технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) и акустоэлектроники (приборы на поверхностных акустических волнах – ПАВ) является перспективным направлением сенсорики, позволяющим расширить функциональные возможности датчиков физических величин [1]. Применение таких датчиков актуально для систем управления транспортом, мониторинга зданий и сооружений в труднодоступных местах, мониторинга и защиты специальных объектов, в охранных комплексах, где нет возможности использовать внешнее питание.

В предыдущих работах [2-4] была рассмотрена конструкция чувствительного элемента микроакселерометра, представляющего собой ПАВ-резонатор, выполненный на окисленной кремниевой подложке с тонкой пьезоэлектрической пленкой окиси цинка или ниобата лития. ПАВ-топология при этом расположена в зоне механической деформации. Съем сигнала в таком устройстве осуществляется по радиоканалу специальным считывающим устройством путем измерения резонансной частоты, которая, в свою очередь, зависит от приложенной физической величины. В работе [5] рассматриваются результаты разработки и оптимизации схемы построения

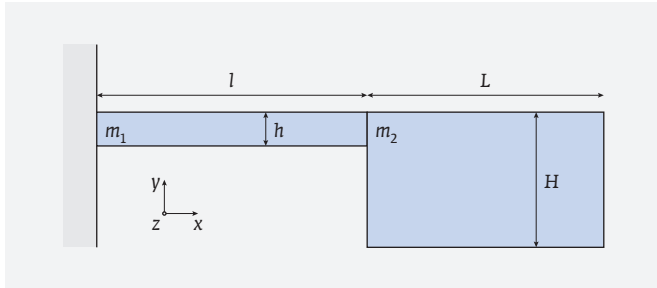


Рис. 1. Расчетная схема ЧЭ

ния микроакселерометра на ПАВ на основе кварца ST-среза. Показано, что эффективность съема информации и качество измеряемого сигнала напрямую зависят от равномерности распределения деформации в области гибкого подвеса.

Настоящая работа посвящена моделированию конструкции чувствительного элемента (ЧЭ) микроакселерометра по технологии микромеханики и акустоэлектроники в части формы и размеров гибкого подвеса и инерционной массы (ИМ). Результаты моделирования используются для дальнейшей разработки на вышеуказанной структуре ЧЭ на основе ПАВ-резонатора.

ПАВ-резонатор имеет габаритные размеры 2400×700 мкм. Микроакселерометр имеет маятниковую конструкцию (рис. 1) и рассчитывается исходя из следующих параметров: диапазон измерения ±5g, резонансная частота конструкции 200 Гц, погрешность измерения 5%, критические напряжения в кремнии при максимальном воздействии 50g 10⁹ Па.

РАСЧЕТ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИЙ МЭМС-ПАВ АКСЕЛЕРОМЕТРА

Чувствительный элемент микроакселерометра представляет собой маятниковую конструкцию. Расчетная схема ЧЭ представлена на рис. 1, где l и h – длина и толщина упругого подвеса; L и H – длина и толщина инерционной массы (ИМ); m_1 и m_2 – масса упругого подвеса и ИМ. Ширина подвеса и ИМ обозначены как b и B соответственно. Для дальнейших расчетов принимается $m_1 / m_2 \ll 1$. Воздействие ускорения на ИМ рассматривается, как сосредоточенная сила и крутящий момент [5].

Нормальные напряжения в сечении балки определяются как [6]:

$$\sigma = \frac{M_x}{W_z} = \frac{F(l-x)h}{J_z} + \frac{M}{J_z} \quad (1)$$

Таблица 1. Зависимость неравномерности деформации от отношения L/l

L/l , отн. ед.	1	5	10	15
$\Delta\varepsilon/\varepsilon, \%$	70	26,4	14	9,8

где $M_x = Fx + M$ – суммарное воздействие сил и моментов на подвес; $F = ma$ – сила, возникающая при воздействии ускорения; $M = maL/2$ – крутящий момент, возникающий при воздействии ускорения; $m_2 = \rho BHL$, где ρ – плотность кремния; a – приложенное ускорение; W_z – момент сопротивления сечения балки относительно оси z , в данном случае определяется как: $W_z = J_z \cdot 2/h$ (для поверхностных напряжений); J_z – момент инерции сечения относительно оси z и равен: $J_z = bh^3/12$; x – координата вдоль подвеса.

Выражение для деформации $\varepsilon = \Delta l/l$ получается из закона Гука:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F(l-x)h}{EJ_z} + \frac{M}{EJ_z} \quad (2)$$

Подставив все значения в (2), получим выражение (3), из которого видно, что при значениях l , близких к L наблюдается значительная неравномерность деформации вдоль подвеса:

$$\varepsilon = \frac{3(2(l-x)+L)BHL\rho}{Eb^3h^2} a \quad (3)$$

Значения неравномерности деформации от отношения L/l представлены в табл. 1. Учитывая, что размеры ПАВ-резонатора составляют единицы миллиметров, обеспечение хорошей равномерности деформации при использовании такой конструкции приведет к значительному возрастанию габаритов ЧЭ. Конструкции с переменным сечением позволяют добиваться однородности без нецелесообразного увеличения габаритов.

КОНСТРУКЦИИ С СЕЧЕНИЕМ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ И ШИРИНЫ

Условие равных поверхностных напряжений подвеса имеет вид:

$$\frac{M_{\max}}{W_{\max}} = \frac{M(x)}{W(x)} = \sigma = const, \quad (4)$$

где W_{\max} – момент сопротивления балки в сечении с наибольшим изгибающим моментом M_{\max} . Поскольку поверхностные напряжения должны быть равны во всех сечениях, то выражение (4) относи-

тельно сечения подвеса в месте крепления ИМ примет вид:

$$\frac{6M}{b_{\min} h_{\min}^2} = \frac{6(F(l-x)+M)}{b(x)h(x)^2}, \quad (5)$$

где b_{\min} , h_{\min} – минимальные ширина и толщина подвеса.

Для конструкции с сечением переменной ширины решение (5) дает зависимость изменения толщины от координаты вдоль подвеса:

$$b(x) = b_{\min} \left(1 + \frac{2(l-x)}{L} \right). \quad (6)$$

Аналогично для конструкции с сечением переменной толщины решение (5) дает зависимость изменения толщины от координаты вдоль подвеса:

$$h(x) = h_{\min} \sqrt{1 + \frac{2(l-x)}{L}}. \quad (7)$$

Рассмотрим конструкцию с сечением переменной толщины и ширины. Функция зависимости толщины от координаты вдоль подвеса задается в виде линейной:

$$h(x) = h_{\min} + (h_{\max} - h_{\min}) \frac{l-x}{l}. \quad (8)$$

Тогда функция $b(x)$ примет вид:

$$b(x) = \frac{b_{\min} \left(\frac{2(l-x)}{L} + 1 \right)}{\left(1 + \frac{(h_{\max} - h_{\min})(l-x)}{h_{\min} l} \right)^2}, \quad (9)$$

где h_{\max} – максимальная толщина подвеса. Из выражения следует, что ширина подвеса будет равномерно убывать от места крепления к кристаллу до ИМ только при условии:

$$h_{\max} < h_{\min} \frac{L+2l}{L+l}. \quad (10)$$

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ

Конструкция ЧЭ анализируется исходя из следующих заданных условий: частотный диапазон $f_{\text{раб}} = 200$ Гц, номинальное ускорение $a_{\text{ном}} = 5g$, максимальные напряжения в слое при максимальной нагрузке $\sigma_{\text{max}} = 10^9$ Па, погрешность преобразования $\eta_{\text{зад}} = 0,5\%$. Ограничивающими условиями для геометрии ЧЭ является размер ПАВ-резонатора, который составляет 2400×700 мкм.

Частотный диапазон маятникового акселерометра определяется резонансной частотой конструкции:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{\Delta y}}, \quad (11)$$

где m – масса конструкции; k – жесткость конструкции; a – приложенное ускорение; Δy – смещение центра масс конструкции под действием ускорения.

Погрешность преобразования определяется поперечной чувствительностью, то есть способностью акселерометра воспринимать ускорение, воздействующее под углом 90° к оси чувствительности:

$$\eta = \frac{M_x}{M_z} = \frac{\Delta y}{l+L/2}. \quad (12)$$

Максимальное допустимое воздействие a_{max} оценивается как $50 a_{\text{ном}}$. При этом значении ускорения напряжения в конструкции не должны превышать максимально допустимые, для кремния это 10^9 Па:

$$\sigma = \frac{3BHL^2 \rho}{bh^2} a_{\text{max}}. \quad (13)$$

Рассмотрим конструкцию с сечением переменной толщины. Уравнение кривизны для оценки прогиба центра масс имеет вид:

$$\frac{F(l-x)+M}{EJ_z(x)} = \frac{d^2 y}{dx^2}. \quad (14)$$

Подставляя в (14) выражения (6), получаем величину прогиба центра масс:

$$\Delta y = 6 \frac{L^2 BHL \rho a}{Eb_{\min} h^3} \left(l + \frac{L}{2} \right). \quad (15)$$

Используя условия (11), (12) и (13), выводится система неравенств для оценки геометрических параметров конструкции. Так как число оцениваемых параметров больше двух, то наименее влияющие на зависимость параметры задаются самостоятельно, а из оставшихся двух один выражается, как функция другого. В данном случае h выражается через L . Система неравенств принимает вид:

$$\begin{cases} h_{\text{погр}} \geq \sqrt[3]{\frac{6\rho BHL^2 a_{\text{ном}}}{Eb_{\min} \eta_{\text{зад}}}} \\ h_{\text{част}} \geq \sqrt[3]{\frac{24\pi^2 \rho BHL^2 f_{\text{раб}}}{Eb_{\min}}} \\ h_{\text{напр}} \geq L \sqrt{\frac{3\rho BHL a_{\text{max}}}{b_{\min} \sigma_{\text{max}}}} \end{cases} \quad (16)$$

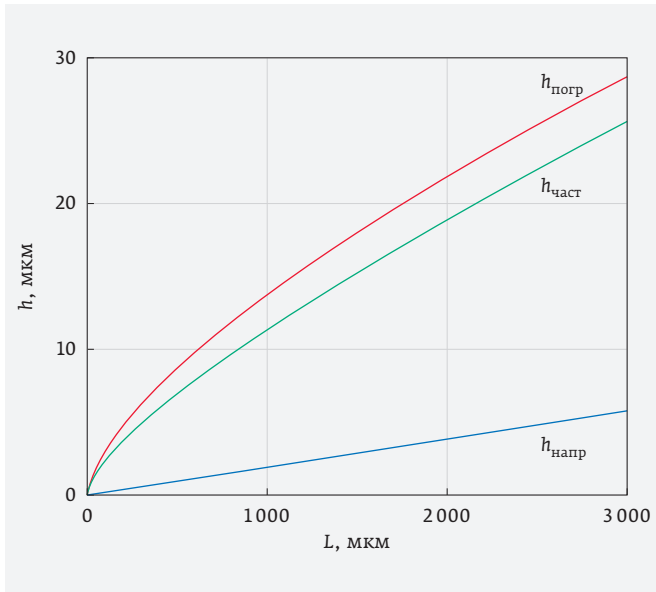


Рис. 2. Графическое решение системы неравенств (16)

Система решается графически (рис. 2). Параметры системы задаются следующие: $V=2000$ мкм, $H=380$ мкм, $b_{min}=700$ мкм, $l=3000$ мкм (так как на краях подвеса наблюдаются пики неравномерности).

Заштрихованная область на рис. 2 соответствует значениям, которые обеспечивают заданные параметры конструкции. Примем длину ИМ также

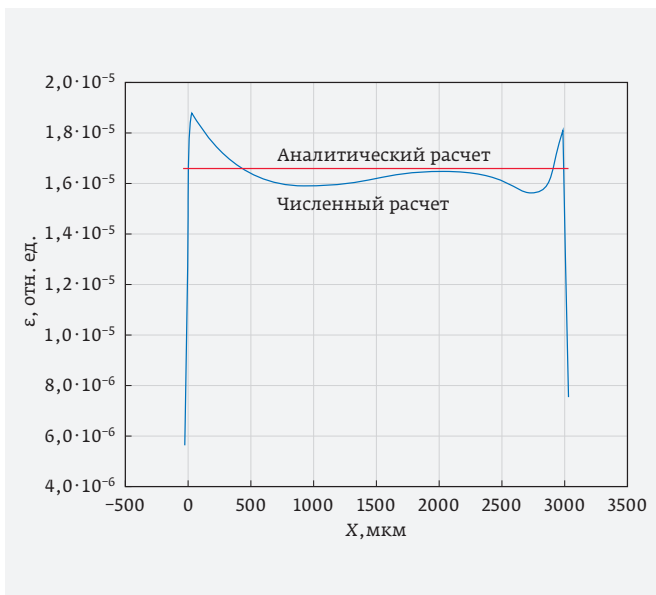


Рис. 3. Результат моделирования распределения деформации вдоль оси X подвеса переменной ширины, $\Delta\epsilon/\epsilon=5,6\%$

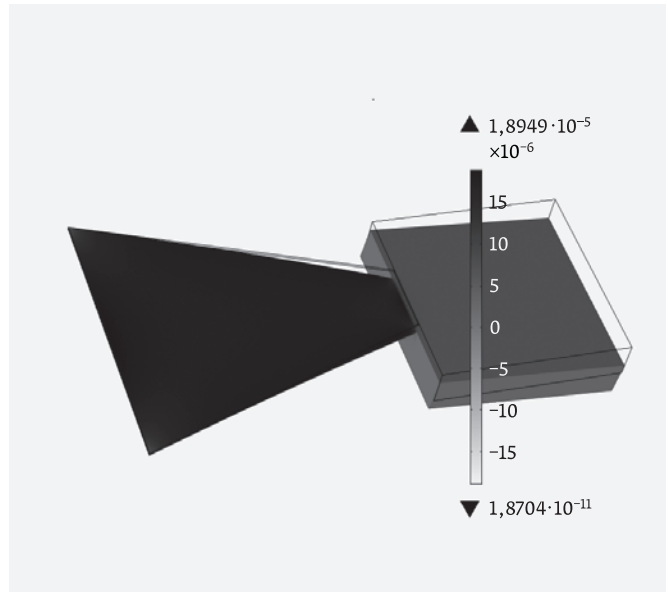


Рис. 4. Результат моделирования распределения деформации по подвесу конструкции с подвесом переменной ширины

2000 мкм, тогда ей соответствует толщина подвеса 23 мкм.

Для более точной оценки параметров проводится численное моделирование полученной конструкции в ПО COMSOL Multiphysics. На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования.

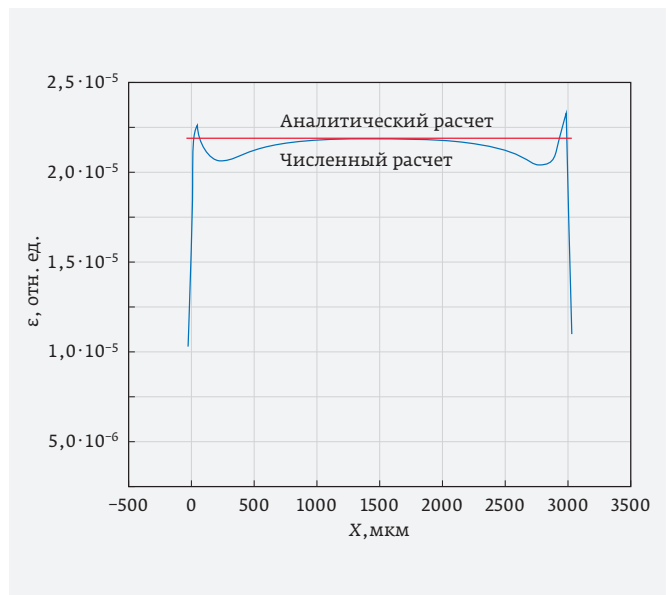


Рис. 5. Результат моделирования распределения деформации вдоль оси X подвеса переменной толщины, $\Delta\epsilon/\epsilon=4,6\%$

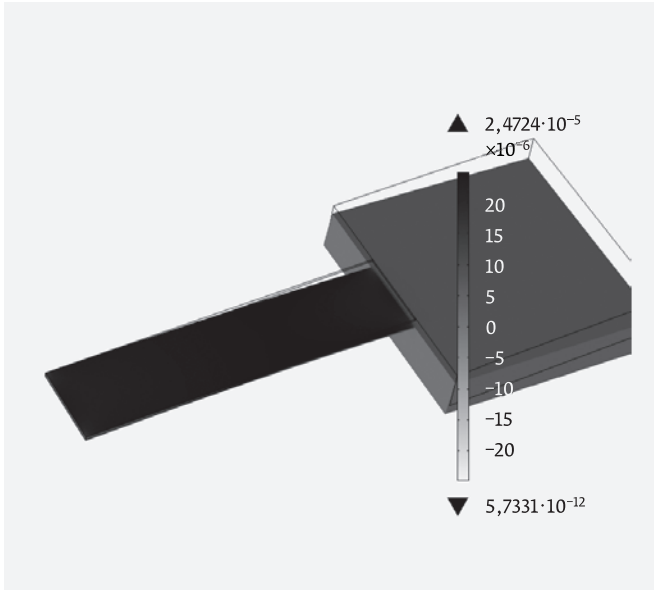


Рис. 6. Результат моделирования распределения деформации по подвесу конструкции с подвесом переменной толщины

Рассмотрим конструкцию с сечением переменной толщины. Прогиб оценивается аналогично из уравнения кривизны:

$$\Delta y = \frac{6BHL^2 a (\sqrt{L(2l+L)} - L)(l + L/2)}{h_{\min}^3 bE}. \quad (17)$$

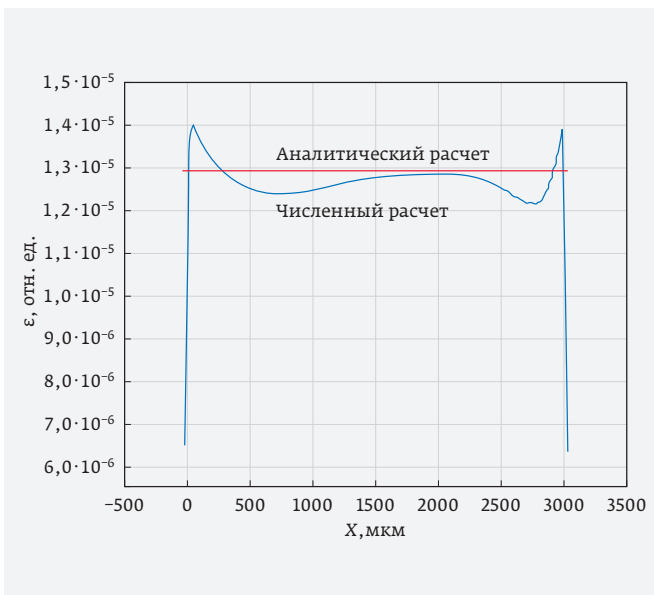


Рис. 7. Результат моделирования распределения деформации вдоль оси X подвеса переменной ширины и толщины при $\Delta\epsilon/\epsilon = 5,5\%$

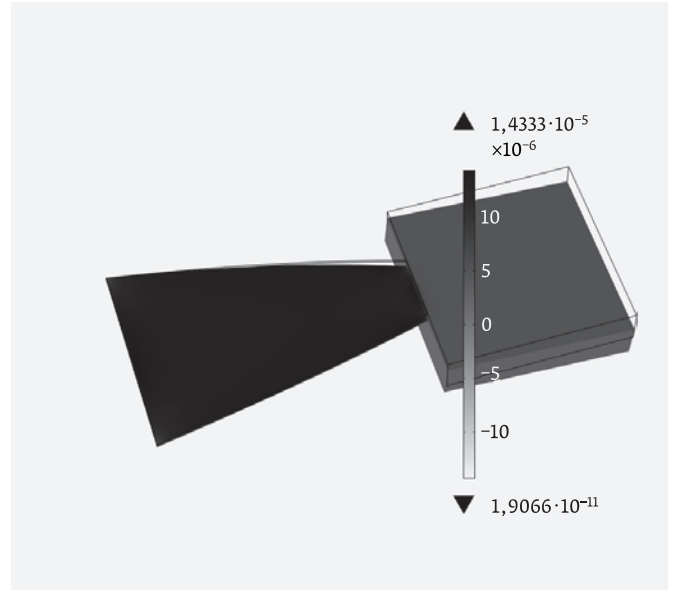


Рис. 8. Результат моделирования распределения деформации по подвесу конструкции с подвесом переменной ширины и толщины

В данном случае h_{\min} выражается через L . Тогда система неравенств примет вид:

$$\begin{cases} h_{\min. \text{порп}} \leq \sqrt[3]{\frac{6BHL^2 \rho a_{\text{ном}} (\sqrt{L(2l+L)} - L)}{bE\eta_{\text{зад}}}} \\ h_{\min. \text{част}} \leq \sqrt[3]{\frac{24f_{\text{паб}}^2 \pi^2 BHL^2 \rho (\sqrt{L(2l+L)} - L)(l + L/2)}{bE}} \\ h_{\min. \text{напр}} \leq \sqrt{\frac{3BHL^2 \rho a_{\text{max}}}{b\sigma_{\text{max}}}} \end{cases} \quad (18)$$

Геометрические размеры B , H и l остаются аналогичными. Длина ИМ принимается равной 2000 мкм, ей соответствует подвес с толщинами $h_{\min} = 20$ мкм, $h_{\max} = 40$ мкм. Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 5 и 6.

Рассмотрим конструкцию с сечением переменной ширины и толщины. Прогиб оценивается аналогично из уравнения кривизны:

$$\Delta y = \frac{6BHLl a \ln\left(\frac{h_{\max}}{h_{\min}}\right) \left(l + \frac{L}{2}\right)}{h_{\min}^3 b_{\min} (h_{\max} - h_{\min}) E}. \quad (19)$$

В данном случае L выражается через h_{\min} . Не стоит забывать, что для конструкции с сечением переменной толщины и ширины есть дополнительное

Таблица 2. Сравнение конструкций ЧЭ с подвесом различного сечения

Параметр	Заданное значение	Переменная толщина и ширина		Переменная толщина		Переменная ширина	
		аналитический расчет	численный расчет	аналитический расчет	численный расчет	аналитический расчет	численный расчет
Погрешность, %	0,5	0,43	0,23	0,44	0,25	0,27	0,17
Частота, Гц	200	268	329	266	339	334	414
Максимальные напряжения, Па	10^9	$2,8 \cdot 10^7$	$2,79 \cdot 10^7$	$3,7 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^7$	$2,19 \cdot 10^7$
Длина подвеса, мкм	3000	–	–	–	–	–	–
Макс. толщина подвеса, мкм	–	23	–	40	–	30	–
Мин. толщина подвеса, мкм	–	23	–	20	–	26	–
Макс. ширина подвеса, мкм	–	2800	–	700	–	2100	–
Мин. ширина подвеса, мкм	700	–	–	–	–	–	–
Длина ИМ, мкм	–	2000	–	2000	–	2000	–
Ширина ИМ, мкм	2000	–	–	–	–	–	–

условие (10). Частотное условие в данном случае не используется из-за сложности преобразования. Тогда система неравенств принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{\text{погр.}} \leq \sqrt{\frac{n_{\text{зад}} b_{\text{min}} h_{\text{min}}^2 (h_{\text{max}} - h_{\text{min}}) E}{6 \text{ВН} \rho a \ln\left(\frac{h_{\text{max}}}{h_{\text{min}}}\right)}} \\ L_{\text{напр.}} \leq \sqrt{\frac{\sigma_{\text{max}} b_{\text{min}} h_{\text{min}}^2}{3 \text{ВН} \rho a}} \\ L_{\text{лин.}} < \frac{l(1,4 h_{\text{min}} - h_{\text{max}})}{h_{\text{max}} - h_{\text{min}}} \end{array} \right. \quad (20)$$

Геометрические размеры B , H и l остаются аналогичными, h_{max} задается равной 30 мкм. Длина ИМ принимается равной 2000 мкм, ей соответствует подвес с толщинами $h_{\text{min}}=26$ мкм. Резуль-

таты компьютерного моделирования представлены на рис. 7 и 8.

Результаты расчета и моделирования трех различных конструкций представлены в табл. 2. Все типы конструкции обеспечивают равномерность деформации не более 6%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены численные расчеты конструкции микроакселерометра по технологии микромеханики и акустоэлектроники. Результаты указанных расчетов позволили определить оптимальное соотношение размеров ИМ и гибкого подвеса. Было показано, что добиться равномерной деформации можно путем использования гибкого подвеса с сечением переменной ширины, толщины или их комбинации. Для каждого варианта достигнут уровень неравномерности деформации подвеса в пределах 6% для номинальной нагрузки в 5g. При этом, вариант

подвеса с переменной шириной наиболее предпочтителен с технологической точки зрения. Полученное соотношение используется при разработке чувствительных элементов микроакселерометров с частотами ПАВ 434 МГц и 2,45 ГГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алферов, Ж. И.** Перспективы электроники в России. Гетероструктурная электроника и акустоэлектроника // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2004. № 6. С. 90–93.
2. **Строганов, К. А.** Сенсор на основе МЭМС+ПАВ технологии // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Сенсорика 2013», с. 34–35.
3. **Бакулин Е.М., Строганов К.А.** Моделирование сенсора на основе интегрированной технологии микромеханики и акустоэлектроники на структуре ниобат лития-кремний // Academy 5 (20). 2017. С. 34–41.
4. **Строганов К.А., Калинин В.А., Пащенко В.П.** Преобразователь линейного ускорения консольного типа для эксплуатации в специальных условиях // Вопросы радиоэлектроники. 2012. Т. 1. № 1. С. 131–141.
5. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2007. С. 400.
6. **Федосьев В. И.** Сопротивление материалов. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. С. 166–200.

СПОСОБ ОЦЕНКИ ЛАТЕНТНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ РЕГИСТРАЦИИ БИОПОТЕНЦИАЛОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА

► С. В. Забодаев^{1, 2}, С. В. Селищев¹

¹НИУ «МИЭТ», ²ООО «МКС»

В работе рассматривается структурная схема передачи данных между устройством для регистрации биологических сигналов и электронно-вычислительной машиной. Описывается способ оценки временного интервала между моментами возникновения потенциала на входе регистрирующей системы и получения оцифрованных данных прикладной программой. Представлены результаты оценки латентности передачи данных с использованием протокола Lab Streaming Layer для усилителей биопотенциалов NVX52 и NVX136.

METHOD OF EVALUATION OF DATA STREAM LATENCY IN BRAIN BIOPOTENTIALS ACQUISITION SYSTEMS

S. V. Zabodaev^{1, 2}, S. V. Selishchev¹

¹NRU MIET, ²MCS Ltd.

This paper describes structural scheme of data transfer between device for acquisition of biological signals and computer. Method for estimating of time interval between the moment of occurrence of potential at the input of an acquisition system and the moment of receiving of digitized data by applied software is described. Results of evaluation of the data stream latency using Lab Streaming Layer protocol for the amplifiers of biopotentials NVX52 and NVX136 are presented.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время одним из наиболее развивающихся направлений нейрофизиологических исследований являются эксперименты, в основу которых заложена парадигма замкнутого цикла (англ. *Closed-loop*) [1, 2, 3]. Этот подход подразумевает регистрацию биомедицинских данных, преимущественно электроэнцефалограммы, обработку сигналов в режиме реального времени прикладным программным обеспечением, и управление внешним программным или аппаратным обеспечением. В качестве внешнего программного обеспечения может выступать программа предъявления стимулов испытуемому (напр. *Presentation* или *E-prime*), а примером аппаратного обеспечения может служить фотостимулятор или транскраниальный магнитный стимулятор. Простейшими примерами реализации пара-

дигмы замкнутого цикла являются интерфейсы мозг-компьютер, в которых результатом математической обработки биологических сигналов является движение фигур на экране монитора, появление цифр и букв, и даже управление экзоскелетом [4, 5] или инвалидной коляской [6, 7]. В отдельную группу экспериментов с применением парадигмы замкнутого цикла можно отнести исследования с применением различных видов стимуляции (электрической, магнитной, визуальной) в зависимости от текущего функционального состояния головного мозга [8-10]. В контексте реализации подобных решений важной задачей становится достижение быстрого доступа к регистрируемым сигналам электроэнцефалограммы, то есть обеспечение условий реального времени с целью проведения внешней стимуляции в определенный момент, соответствующий

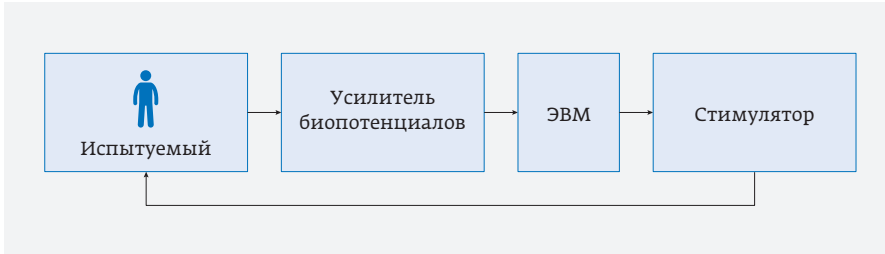


Рис. 1. Схема реализации принципа замкнутого цикла в системе регистрации и анализа биопотенциалов

тому или иному состоянию центральной нервной системы [11, 12].

ПОТОКИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ РЕГИСТРАЦИИ БИОПОТЕНЦИАЛОВ

В общем виде, система для регистрации и анализа биопотенциалов головного мозга, реализующая принцип замкнутого цикла, состоит из испытуемого, подключенного к усилителю биопотенциалов с помощью электродной системы, электронной вычислительной машины, осуществляющей интерфейс взаимодействия с регистрирующим устройством, принимая и обрабатывая данные, и внешнего стимулирующего устройства (рис. 1). В результате анализа входных биологических сигналов программа обработки направляет команду внешнему стимулирующему устройству, которым может быть как транскраниальный электрический или магнитный стимулятор, так и система предъявления визуальных или акустических стимулов.

В последнее время большую популярность приобретает протокол *Lab Streaming Layer* (далее LSL) [13, 14], который, являясь частью измерительной системы, используется для передачи мультимодальных данных от измерительного устройства в прикладную программу обработки сигналов. LSL – является надстройкой над сетевым протоколом TCP/IP, позволяя передавать данные по проводной и беспроводной сети с минимальной задержкой (1-2 мс) [13, 15] в прикладные программы обработки данных, реализованных с применением таких языков программирования как C++, Matlab, Python, Java и т. д.

Целью данного исследования является разработка способа оценки временного интервала между событиями возникновения регистрируемого потенциала на входе усилителя и приходом оцифрованных данных в прикладную программу анализа сигнала. Верификация предлагаемого способа проводится на примере коммерчески доступных систем для регистрации биологических сигналов.

На рис. 2 показана схема потоков данных в системе регистрации биопотенциалов головного мозга на базе электроэнцефалографического усилителя серии NVX (Медицинские компьютерные системы, г. Зеленоград, Москва), реализующая принцип замкнутого цикла. На схеме показаны все возможные блоки обработки и хранения данных, которые вносят дополнительную

задержку в процессе передачи информации в программу обработки, проводя буферизацию данных. Стоит справедливо отметить, что буферизация данных необходима для предотвращения потерь и обеспечения стабильной передачи данных.

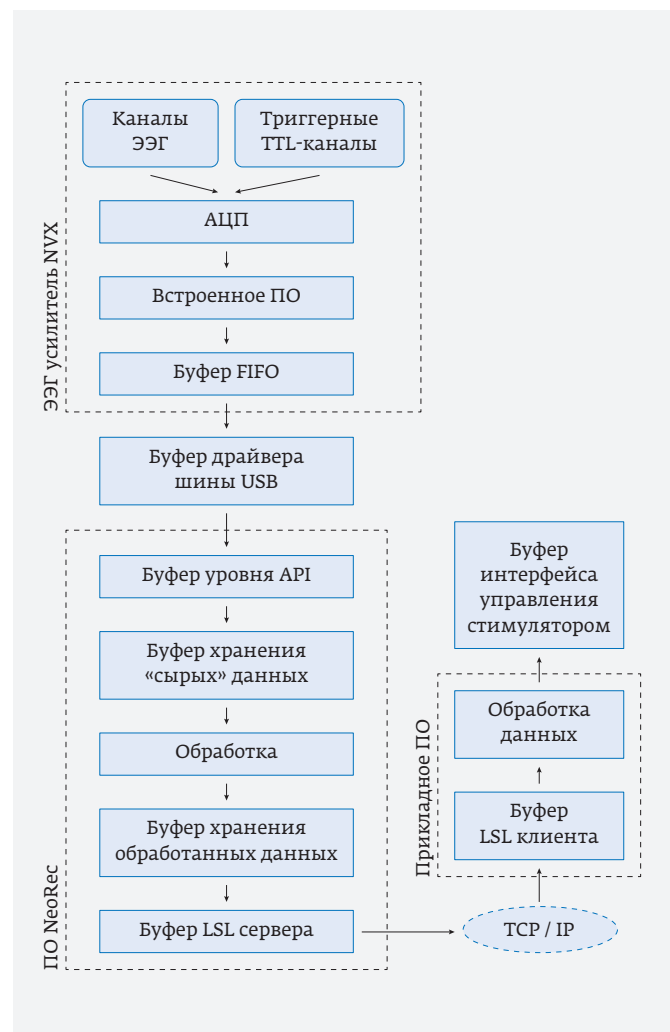


Рис. 2. Схема потоков данных в системе замкнутого цикла на базе усилителя NVX

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование латентности передачи данных проводилось для электроэнцефалографических усилителей NVX52 и NVX136 (Медицинские компьютерные системы, г. Зеленоград, Москва), поскольку они имеют отличия в аппаратной и программной реализации и, следовательно, могут дать различные результаты. Оба усилителя имеют каналы для регистрации электроэнцефалограммы и триггерные TTL-совместимые (*Transistor-Transistor Logic*) каналы для синхронизации с программами предъявления стимулов. Усилители подключаются к электронной вычислительной машине (далее ЭВМ) при помощи интерфейса USB2.0. Характеристики ЭВМ: процессор *Intel Core i7 3.6 GHz*, *16 Gb* ОЗУ, операционная система *Windows 7 x64*. Программное обеспечение для взаимодействия с усилителем и формирования LSL-сервера – *NeoRec* (версия 1.4.8639) [16]. Программа формирует два потока LSL: синхронный поток данных ЭЭГ с фиксированной частотой дискретизации сигнала и асинхронный поток с метками триггерных каналов. Верификация проводилась отдельно для каждого потока.

В качестве программного обеспечения, реализующего функции LSL-клиента и обработчика данных, рассматривались приложение, выполненное с использованием языка программирования C++ (среда разработки *Visual Studio 2013*), и сценарий, выполненный с использованием языка программирования *Matlab* (платформа *Matlab R2013b*). Поскольку язык программирования *Matlab* является интерпретируемым, в отличие от компилируемого C++, суммарное время выполнения одних и тех же операций будет выше, что априори даст более высокий показатель латентности системы замкнутого цикла.

Для реализации петли обратной связи использовался интерфейс RS-232, с использованием микросхемы электрического согласования *MAX232* для приведения выходного напряжения к уровню TTL. Выход интерфейса подключался к входным каналам для регистрации ЭЭГ или триггерным каналам в зависимости от тестируемого потока данных.

Схема эксперимента выглядела следующим образом. К одному из входных каналов усилителя подключался генератор специальных сигналов Нейротест 7В, который формировал последовательность коротких прямоугольных импульсов шириной 2 мс, амплитудой 5 В и частотой 1 Гц. В программе *NeoRec* запускалась трансляция потока LSL с выбранной частотой дискретизации сигнала. Программа или сценарий LSL-клиента представляли собой бесконечный цикл, производящий выборку данных из

потока LSL, разбор блока цифровых отсчетов сигнала и отправку команды формирования ответного импульса по протоколу RS-232 в момент определения перепада напряжения, вызванного внешним генератором. В случае синхронного потока данных, алгоритм представлял собой простой амплитудный детектор. В случае асинхронного потока меток триггерных каналов – проводился разбор входного вектора данных. Сформированный ответный импульс передавался на один из входных каналов усилителя, отличный от того, к которому подключался внешний генератор. Таким образом, проводилось формирование двух последовательных прямоугольных импульсов, которые поступали в прикладную программу. Разница между двумя временными отсчетами составляет искомую величину латентности передачи данных. Поскольку синхронность каналов данных усилителя и постоянство частоты дискретизации сигнала обеспечиваются на аппаратном уровне, такой способ измерения временного интервала можно справедливо считать достаточно точным в рамках данного исследования.

В программе *NeoRec* предусмотрена дополнительная настройка частоты выдачи данных транслируемому потоку LSL, которая управляет размером буфера хранения данных перед отправкой и задержкой между соседними пакетами данных. Тестирование проводилось для каждого из трех возможных вариантов параметра: *Optimal*, *High* и *Super High*. При выборе последнего варианта, обработанные данные транслируются в поток LSL, минуя буферизацию.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Получение последовательности временных интервалов между двумя прямоугольными импульсами проводилось на двух частотах дискретизации сигнала – 2 кГц и максимально возможной для тестируемого усилителя. Для усилителя NVX52 максимально возможная частота составила 10 кГц. Для усилителя NVX136 – 25 кГц. В ходе каждой серии измерений получено не менее 200 значений временных интервалов для каждого режима тестирования. В каждом случае распределение выборки оказалось близким к нормальному. На рис. 3, 4, 5 и 6 представлены результаты измерений в виде среднего значения для каждой последовательности и соответствующего ему вариационного размаха.

ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Стоит отметить, что в искомую величину латентности передачи данных, помимо временного интервала между моментом возникновения потенциала

на входе усилителя и получения оцифрованных данных прикладным программным обеспечением (далее ПО), входит задержка на обработку массива поступающих данных и задержка на формирование команды в петле обратной связи. Таким образом, истинное значение искомой величины априори будет значительно ниже результата измерения, полученного в ходе эксперимента.

Из полученных результатов следует, что наихудшее значение латентности передачи данных наблюдается при использовании режима *Optimal*, что может указывать на отсутствие оптимизации частоты выдачи данных. Данные передаются редко и большими блоками, что позволяет снизить нагрузку на локальную сеть в случае использования удаленного LSL-клиента. По причине нестабильного интервала выдачи данных в режиме *Optimal*, его следует исключить из дальнейшего рассмотрения, несмотря на сужение вариационного размаха при использовании LSL-клиента на базе языка C++. При использовании режимов: *High* и *Super High* суммарная латентность передачи данных снижается, что вполне ожидаемо. Также, снижение латентности наблюдается при использовании клиентского приложения, реализованного при помощи языка программирования C++, по сравнению с языком *Matlab*, что может указывать на различие механизмов выделения памяти и обработки данных при получении пакета данных из потока. Сужение вариационного размаха при использовании различных клиентов особенно заметно для асинхронного потока данных. С увеличением частоты дискретизации сигнала происходит незначительное снижение суммарной латентности что может указывать на особен-

ности реализации алгоритмов работы встроенного ПО усилителя. Наименьшее значение латентности и вариационного размаха для каналов данных ЭЭГ наблюдается для усилителя NVX136 в режиме *Super High* для частоты дискретизации сигнала 25 кГц – 14 ± 4 мс.

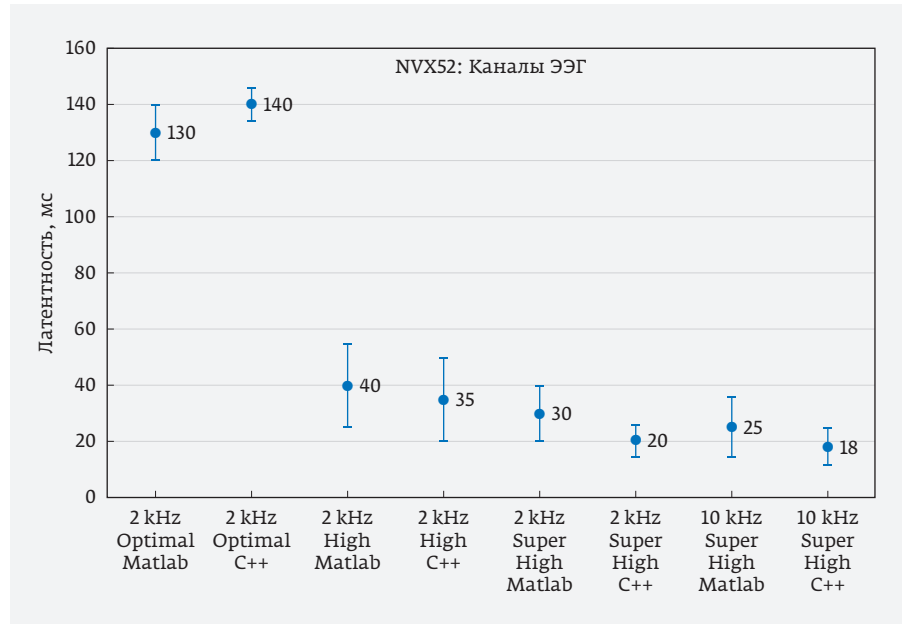


Рис. 3. Результаты измерения латентности для каналов ЭЭГ усилителя NVX52

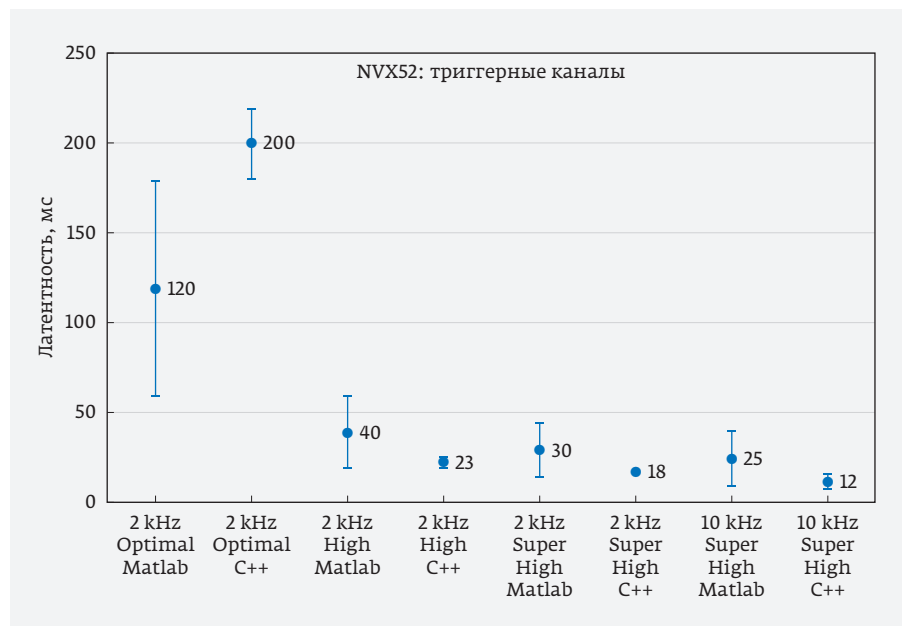


Рис. 4. Результаты измерения латентности для триггерных каналов усилителя NVX52

Разработанный способ можно успешно применять для оценки латентности передачи данных в электроэнцефалографических системах замкнутого цикла, а также для выявления возможных узких мест на всем пути передачи потока данных от регистрирующего оборудования к прикладному программному обеспечению для анализа сигнала. Метод может использоваться разработчиком оборудования и встроенного ПО для отладки системы. Для реализации сложных нейрофизиологических экспериментов, требующих точной установки стимулирующего воздействия в определенный момент времени, разработчику алгоритмов анализа сигнала необходимо учитывать временные затраты на обработку входного массива данных, выбирая программную платформу, частоту дискретизации сигнала и интерфейс взаимодействия со стимулирующим устройством.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zrenner C., Belardinelli P., Müller-Dahlhaus F., Ziemann U.** Closed-loop neuroscience and non-invasive brain stimulation: a tale of two loops. *Front Cell Neurosci* 2016;10:92. DOI: 10.3389/fncel.2016.00092. PMID: 27092055.
2. **Ngо H.-V. V., Miedema A., Faude I., Martinetz T., Mölle M. and Born J.** Driving Sleep Sww Oscillations by Auditory Closed-Loop Stimulation – A Self-Limiting. – *Process Journal of Neuroscience*, 2015. 6630 p.
3. **Xu R., Jiang N., Lin C., Mrachacz-Kersting N., Dremstrup K., Farina D.** Enhanced Low-

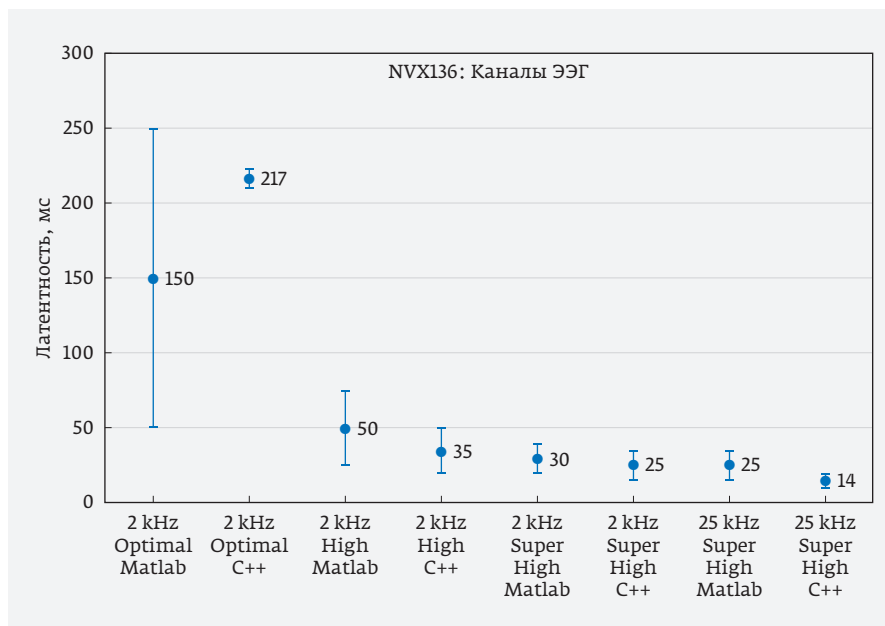


Рис. 5. Результаты измерения латентности для каналов ЭЭГ усилителя NVX136

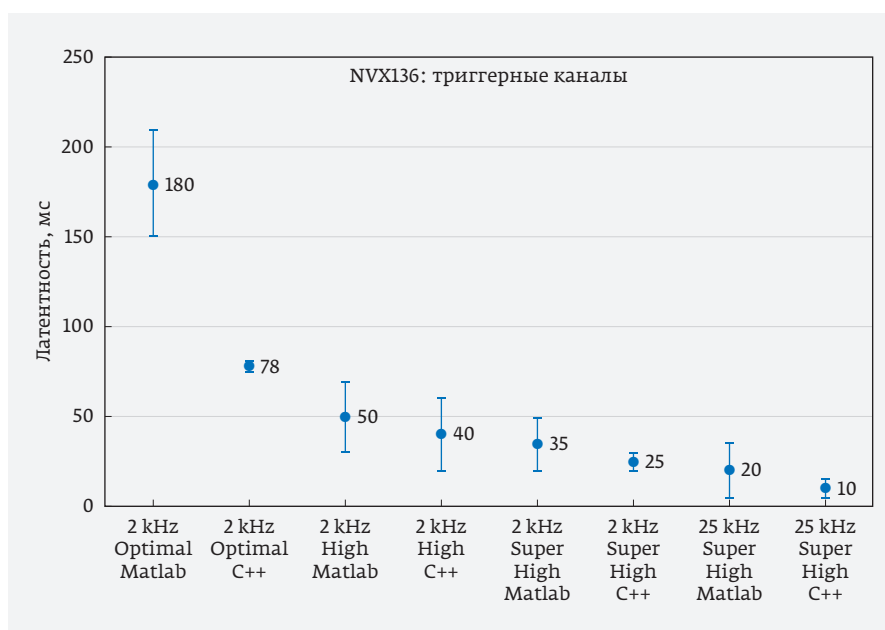


Рис. 6. Результаты измерения латентности для триггерных каналов усилителя NVX136

latency Detection of Motor Intentions from EEG for Closed-loop Brain-Computer Interface Applications // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* Vol. 61. No. 2. 2014. 288 p.

4. **Pons J.L.** Rehabilitation exoskeletal robotics // *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* Vol. 29. 2010. 187 p.

5. **Nilsson A., Vreede K.S., Haglund V., Kawamoto H., Sankai Y., Borg J.** Gait training early after stroke with a new exoskeleton – the hybrid assistive limb: a study of safety and feasibility. *J NeuroEngineering Rehabil.* 2014; 11:92. DOI: 10.1186/1743-0003-11-92.
6. **Gal´an F., Nuttin M., Lew E., Ferrez P.W., Vanacker G., Philips J., Mill´an and J. D. R.** A brain-actuated wheelchair: Asynchronous and noninvasive brain-computer interfaces for continuous control of robots // *Clin. Neurophysiol.* Vol. 119. 2008. 2159 p.
7. **Vanacker G., Millán J. del R., Lew E., Ferrez P.W., Galán F., Philips J., Van Brussel H., Nuttin M.** Context-based filtering for assisted brain-actuated wheelchair driving. *Comput. Intell. Neurosci* 2007; DOI: 10.1155/2007/25130.
8. **Bergmann T.O., Mölle M., Schmidt M.A., Lindner C., Marshall L., Born J.** EEG-guided transcranial magnetic stimulation reveals rapid shifts in motor cortical excitability during the human sleep slow oscillation. *J Neurosci.* 2012; 32:243–253. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.4792-11.2012.
9. **Ilmoniemi R.J., Kicić D.** Methodology for combined TMS and EEG. *Brain Topogr.* 2010; 22:233–248. DOI: 10.1007/s10548-009-0123-4.
10. **Berényi A., Belluscio M., Mao D. and Buzsáki G.** Closed-loop control of epilepsy by transcranial electrical stimulation. *Science.* 2012; 337:735–737. DOI: 10.1126/science.1223154.
11. **Ngo H.-V. V., Martinetz T., Born J., Mölle M.** Auditory Closed-Loop Stimulation of the Sleep Slow Oscillation Enhances Memory. – *Neuron*, Volume 78, Issue 3, 2013. 545 p.
12. **Santostasi G., Malkani R., Riedner B., Bellesi M., Tononi G., Paller K.A.** Phase-locked loop for precisely timed acoustic stimulation during sleep // *J. Neurosci. Methods.* 2016. 101 p.
13. **Kothe C.A., and Makeig S.** BCILAB: a platform for brain-computer interface development // *J. Neural Eng.* 2013. 6014 p.
14. Репозиторий Lab Streaming Layer. [Электронный ресурс] URL: <https://github.com/sccn/labstreaminglayer> (дата обращения: 17.04.2018).
15. LSL Validation [Электронный ресурс]. URL: https://sccn.ucsd.edu/~mgrivich/LSL_Validation.html (дата обращения 17.04.2018).
16. НеоРес программа для регистрации ЭЭГ [Электронный ресурс]. URL: <https://mks.ru/product/неорес/> (дата обращения 17.04.2018)

О ПРИЧИНАХ СОМНЕНИЙ В РЕАЛЬНОСТИ КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА

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

Рассматриваются причины сомнений в реальности квантового компьютера, такие как противоречие идеи квантовых вычислений с реализмом, сомнения в возможности мистического действия на расстоянии и существовании множества параллельных вселенных. Идея квантовых вычислений появилась вследствие непонимания смысла спора между критиками (Эйнштейн и др.) и защитниками (Бор и др.) квантовой механики. Появление квантовой информатики свидетельствует, скорее, о кризисе физики, чем о технологическом прорыве.

THE REASONS FOR DOUBTS ABOUT THE REALITY OF QUANTUM COMPUTER

V.V. Aristov, A.V. Nikulov

IMT RAS

The causes of doubts about the reality of quantum computer, such as the contradiction of quantum mechanics with realism, doubts about the possibility of 'spooky action at a distant' and the existence of many parallel universes, are considered. The idea of quantum computing appeared as a result of misunderstanding of the dispute between critics (Einstein et al.) and defenders (Bohr et al.) of quantum mechanics. The appearance of quantum information science reveals the crisis of physics rather than the technological breakthrough.

ВВЕДЕНИЕ

Создание квантового компьютера сейчас считается одной из главных задач самых передовых современных технологий. Крупнейшие компании мира, такие как Google, IBM, Intel и другие, финансируют исследования по созданию квантового компьютера, в частности на основе сверхпроводящих квантовых битов (кубитов). В нашей стране также реализуется проект «Создание технологии обработки информации на основе сверхпроводящих кубитов», конечной целью которого является создание универсального квантового компьютера на основе сверхпроводящих квантовых битов. Столь широкий интерес к созданию квантового компьютера возник не случайно. Он связан с колоссальными успехами микроэлектроники и нанотехнологии [1]. Сейчас поставлена задача изготовления ИС с минимальным размером элементов менее 10 нм. Дальнейший прогресс в развитии вычислительной техники по закону Мура представляется невозможным. Пре-

жде всего этот предел в развитии на основе миниатюризации вызвал интерес к альтернативным способам вычислений. Наибольший интерес возник к квантовым вычислениям, так как известно, что значение квантовых явлений возрастает с уменьшением размера структур.

Уверенность в реальности квантового компьютера базируется на том несомненном факте, что квантовые явления наблюдаются. А уверенность в возможности сверхпроводящих квантовых битов основывается на том несомненном факте, что сверхпроводимость это макроскопическое квантовое явление. Но наличие квантовых явлений еще не гарантирует реальности квантового компьютера, принцип действия которого основан на самом парадоксальном принципе квантовой механики – корреляции Эйнштейна – Подольского – Розена (ЭПР). Сомнение в реальности квантового компьютера возникает потому, что этот принцип противоречит локальному реализму. А сомнение

в реальности сверхпроводящих кубитов вызывает противоречие их идеи макроскопическому реализму. Поводы для сомнения в реальности квантового компьютера будут приведены в следующей главе. Смысл ЭПР корреляции будет рассмотрен в третьей главе. В четвертой главе рассматриваются no-go theorems, обосновывающие отказ от реализма. В пятой главе рассматривается связь идеи квантового компьютера с отказом от реализма. Возможность отказа от реализма рассматривается в шестой главе. В заключении указывается на то, что популярность идеи квантовой информатики свидетельствует, скорее, о кризисе физики, чем о технологическом прорыве.

ПОВОДЫ ДЛЯ СОМНЕНИЙ В РЕАЛЬНОСТИ КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА

Противоречие квантовой механики с реализмом возникло с предложением Вернера Гейзенберга, сделанном в 1925 году, описывать не то, что существует, а то, что наблюдается [2]. Это предложение с самого начала было негативно встречено Эйнштейном. Как вспоминал сам Гейзенберг, в беседе после его выступления в 1926 году в Берлинском университете Эйнштейн сказал, что «с принципиальной точки зрения желание строить теорию только на наблюдаемых величинах совершенно нелепо. Потому что в действительности все ведь обстоит как раз наоборот. Только теория решает, что именно можно наблюдать. Видите ли, наблюдение, вообще говоря, есть очень сложная система» [3]. С этого начался многолетний спор между критиками (Эйнштейн, Шредингер, де Бройль и др.) и защитниками (Гейзенберг, Бор, Дирак, Борн и др.) квантовой механики. Идея квантовых вычислений появилась вследствие этого спора. Причем критики квантовой механики сыграли в появлении этой идеи большую роль чем ее защитники. Поэтому для понимания смысла идеи квантовых вычислений необходимо понимать суть великого спора о квантовой механике.

Большинство физиков вслед за Гейзенбергом не хочет понимать, почему совершенно нелепо строить теорию на наблюдаемых величинах. Чтобы это объяснить, Эйнштейн вместе с Подольским и Розеном предложили в знаменитой статье 1935 года [4] мысленный эксперимент, доказывающий, что квантовая механика является неполным описанием физической реальности, если теория не предполагает возможности «мистического действия на расстоянии». Именно это «мистическое действие на расстоянии» стали называть корре-

ляцией Эйнштейна – Подольского – Розена, или ЭПР-корреляцией. ЭПР считали ЭПР-корреляцию нереальной. Это является первым поводом для сомнения в реальности квантового компьютера.

Вторым поводом является определение, данное Шредингером ЭПР-корреляции как запутанности (перепутанности) наших знаний (entanglement of our knowledge): «Максимальное знание о всей системе не обязательно включает полное знание о всех ее частях, даже если они полностью отдалены друг от друга и совсем не взаимодействуют в данный момент» [5]. Согласно Шредингеру ЭПР-корреляция описывает не нечто реальное, существующее независимо от того знаем мы о нем или не знаем, а наши знания о чем-то.

Третьим поводом для сомнений является противоречивое отношение к спору об ЭПР-корреляции между Эйнштейном и Бором. Большинство физиков на стороне Бора в этом споре. Но ирландский физик Джон Белл, работы которого сыграли решающую роль в появлении идеи квантовых вычислений, благодаря неравенствам Белла [6], был на стороне Эйнштейна. Известно его высказывание о споре между Эйнштейном [4] и Бором [7]: «I felt that Einstein's intellectual superiority over Bohr, in this instance, was enormous as vast gulf between the man who saw clearly what was needed, and the obscurantist» [8].

Четвертым поводом для сомнений является противоположное отношение к неравенствам Белла большинства современных авторов и самого Белла. Авторы одной из самых известных книг по квантовым вычислениям пишут: «Эйнштейн, Подольский и Розен хотели показать, что квантовая механика неполна. ...Природа экспериментально опровергла их точку зрения, подтвердив справедливость традиционных квантовых законов. Главным моментом в этом опровержении явился результат, известный под названием неравенства Белла» [9]. За шестнадцать лет до выхода этой книги, в 1984 году, Белл, имея ввиду экспериментальные свидетельства нарушения неравенств Белла в работе группы Аспе [10], говорил в докладе [11], название которого стало названием сборника его работ [12]: «Для меня эти эксперименты свидетельствуют о реальной проблеме, существующей в квантовой теории. Имеется очевидное противоречие между любой ее строгой формулировкой и теорией относительности».

Пятым поводом является сомнение относительно существования множества параллельных вселенных. На необходимости множества параллельных вселенных для реальности квантового компьютера настаивает Дэвид Дойч, автор идеи квантовых вычислений в главе «Квантовые компьютеры» книги «Структура реальности»: «Для тех, кто все еще

склонен считать, что существует только одна вселенная, я предлагаю следующую задачу: объясните принцип действия алгоритма Шора. Я не имею в виду, предскажите, что он будет работать, поскольку для этого достаточно решить несколько непротиворечивых уравнений. Я прошу вас дать объяснение. Когда алгоритм Шора разложил на множители число, задействовав примерно 10^{500} вычислительных ресурсов, которые можно увидеть, где это число раскладывалось на множители? Во всей видимой вселенной существует всего около 10^{80} атомов, число ничтожно малое по сравнению с 10^{500} » [13].

Все эти поводы связаны между собой и их рассмотрение в следующих главах выявляет причины сомнений в реальности квантового компьютера.

О СМЫСЛЕ ЭПР-КОРРЕЛЯЦИИ

Для решения вопроса о реальности квантового компьютера решающее значение имеет однозначное понимание смысла ЭПР-корреляции. Здесь следует не смешивать, как это часто делают, два принципиально разных вопроса: «Наблюдается ли ЭПР-корреляция и если наблюдается, то почему?» и «Почему квантовая механика предсказывает ЭПР-корреляцию?» Хотя большинство уверено, что ЭПР-корреляция наблюдается, вопрос, как будет показано ниже, нельзя считать окончательно решенным. В любом случае, на вопрос почему ЭПР-корреляция наблюдается может не быть ответа, так как он относится к явлениям мира внешнего по отношению к нашему сознанию, который мы (люди) не создавали. На второй вопрос ответ должен быть однозначным, так как квантовая механика, как любая теория, создана нашим разумом. Ответ на этот вопрос логически выводится из рассмотрения спора об ЭПР-парадоксе между Эйнштейном и Бором.

ЭПР-парадокс

Эйнштейн, Подольский и Розен продемонстрировали с помощью мысленного эксперимента как, вопреки принципу неопределенности Гейзенберга и принципу дополненности Бора, могут быть точно измерены сопряженные величины, например координата и импульс, операторы которых не коммутируют [4]. Частица, импульс которой точно известен, например $p=0$, распадается на две частицы, которые разлетаются на произвольно большое расстояние. Измерив точно импульс одной частицы p_1 , можно точно узнать импульс второй $p_1 = p - p_2 = -p_2$. Далее можно точно измерить координату второй частицы r_2 . Таким образом ЭПР опровергли основы квантовой механики исходя из одного предположения: измерение первой частицы

не может мгновенно повлиять на состояние второй частицы, находящейся на произвольно большом расстоянии.

«Мистическое действие на расстоянии»

Эйнштейн настаивал: «Но одно предположение представляется мне бесспорным. Реальное положение вещей (состояние) системы S_2 не зависит от того, что проделывают с пространственно отделенной от нее системой S_1 » [14]. При этом предположении квантовая механика является, очевидно, не адекватной теорией. Поэтому Бор в своем ответе [7] ЭПР [4], как это отмечает Белл [15], отвергает это предположение. В Приложении 1 «Позиция Бора» статьи 1981 года [15] Белл пишет: «До сих пор большинство современных теоретиков думают, что Бор одержал победу над Эйнштейном в их споре, и сами они разделяют взгляды Бора». Чтобы показать, что они не правы, Белл приводит отрывок из статьи Бора [7], в котором утверждается, что имеется не поддающееся учету взаимодействие между измерительным прибором и удаленной от него на произвольно большое расстояние частицей, которое влияет на самые условия, определяющие возможные типы предсказаний будущего поведения этой частицы. В конце Приложения 1 Белл задает риторический вопрос: «Не отвергает ли, на самом деле, Бор предпосылку – „никакого действия на расстоянии“ – вместо того, чтобы опровергнуть аргумент?» [15].

Основоположники квантовой механики должны были постулировать «мистическое действие на расстоянии», которое стали называть ЭПР-корреляцией, так как иначе квантовая механика предсказывала бы абсурд. Эйнштейн обратил внимание на это еще в 1927 году, в своем выступлении в дискуссии на 5-м Сольвеевском конгрессе [16], рассмотрев простой пример. Электрон, прошедший через небольшое отверстие, распространяется, как сферическая волна вероятности. За отверстием помещена фотопластинка в форме полусферы. До первого наблюдения имеется ненулевая вероятность увидеть электрон в любой точке полусферы. Но после наблюдения частицы в одной точке, вероятность наблюдать электрон в других точках должна мгновенно стать нулевой. Иначе теорию будет предсказывать возможность наблюдения одной частицы в нескольких местах сразу, то есть абсурд. Для избежания абсурда необходимо постулировать мгновенное и нелокальное изменение квантового состояния, что, как справедливо заметил Эйнштейн, «приводит к противоречию с постулатом относительности» [16].

Скачок Дирака

Мгновенное нелокальное изменение квантового состояния при наблюдении, на необходимость которого Эйнштейн указывал в 1927 году, было постулировано Дираком в 1930 году [17]. Сделав утверждение «*после того как произведено первое измерение, в результатах второго нет никакой неопределенности*» [17], очевидное из нашего повседневного опыта, Дирак постулировал изменение квантового состояния: «*Таким образом, мы видим, что измерение всегда вызывает скачок системы в собственное состояние той динамической переменной, измерение которой производилось*» [17]. Скачок Дирака более известен как коллапс волновой функции или редукция квантового состояния, по терминологии введенной фон Нейманом в книге 1932 года [18]. Гейзенберг оправдывал постулат о скачке прерывным изменением наших знаний: «*Так как наше знание под влиянием наблюдения изменяется прерывно, то и величины, входящие в его математическое представление, изменяются прерывно, и потому мы говорим о «квантовом скачке»*» [19]. Прерывное изменение наших знаний приводит, в частности, к определенности результата второго наблюдения: мы не знали и узнали после первого наблюдения, в каком месте пространства находится электрон, в примере рассмотренном Эйнштейном [16]. Но Дирак постулировал скачок не в изменении знаний наблюдателя, а в изменении квантового состояния, которое происходит под влиянием изменения знаний наблюдателя. Поэтому скачок Дирака противоречит реализму, утверждающему, что внешний мир существует независимо от нашего сознания.

Отказ от реализма был постулирован Борном

Шредингер писал о ложном понимании «*того, что на самом деле имеют в виду Бор, Гейзенберг и их последователи. Они имеют в виду что объект не существует независимо от наблюдающего субъекта*» [20]. Действительно, объект, в данном случае квантовое состояние, существует независимо от наблюдающего субъекта только между наблюдениями, в Процессе 2, согласно терминологии фон Неймана [20]. При наблюдении, в Процессе 1 [20], объект должен изменяться скачком под влиянием изменения состояния субъекта, то есть знаний наблюдателя. Такое воздействие субъекта на объект логически выводится из интерпретации волновой функции Шредингера, как описания вероятности наблюдения, предложенной Борном. Большинство ученых отвергли исходную интерпретацию Шредингера и согласились с интерпретацией Борна потому,

что мы не можем думать, что реальная плотность может измениться при наблюдении, в то время как мы знаем из нашего повседневного опыта, что вероятность наблюдения изменяется при наблюдении. Но они не учли, что вероятность наблюдения изменяется прежде всего в нашем сознании и что, следовательно, волновая функция описывает, согласно Борну, прежде всего состояние сознания наблюдателя, которое через скачок Дирака влияет на состояние квантовой системы.

ЭПР-корреляция является следствием отказа от реализма

Создатели квантовой механики отказались от реализма вследствие невозможности реалистического описания некоторых квантовых явлений, например интерференции одиночных частиц на двух щелях [21]. Продемонстрируем на данном примере, что ЭПР-корреляция является следствием отказа от реализма, который подразумевает мгновенное и нелокальное воздействие субъекта на объект. Следуя ЭПР и используя две частицы с суммарным импульсом, близким к нулю, мы можем узнать через какую щель пролетела частица, наблюдая не за ней, а за другой частицей данной ЭПР пары (рис. 1). Мы можем поставить детектирующий экран, определяющий координаты частиц, не только за экраном с двумя щелями, но и с противоположной стороны (рис. 1). Частицы ЭПР-пары могут лететь с одинаковой вероятностью в любую сторону, но они всегда будут лететь в противоположные стороны (рис. 1). Поэтому когда мы увидим, что первая частица ЭПР-пары, полетевшая влево, попала в точку U_r дополнительного экрана на рис. 1, мы узнаем, что вторая частица пролетела через верхнюю щель. Так как при наблюдении происходит скачок Дирака, то согласно квантовой механики какая картина будет наблюдаться за двумя щелями, зависит от того можем ли мы узнать куда полетела первая частица. То есть квантовая механика предсказывает, что картина интерференции не будет наблюдаться, если есть дополнительный экран (1 Detecting Screen на рис. 1), и картина интерференции на 2 Detecting Screen появится если дополнительный экран убрать.

ОТКАЗ ОТ РЕАЛИЗМА И NO-GO THEOREMS

Предсказания подобного рода, которые можно было сделать сразу после появления интерпретации Борна в 1926 году, вызвали протест Эйнштейна, Шредингера, Белла и других критиков

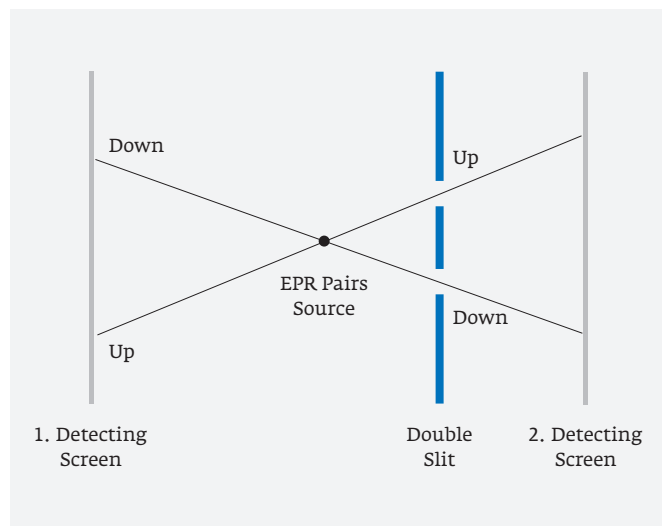


Рис. 1. Согласно основам квантовой механики результат наблюдения на втором детектирующем экране зависит от наличия или отсутствия первого экрана. При наличии экрана мы можем узнать через какую щель Up или Down пролетела частица ЭПР-пары, полетевшая вправо, наблюдая в какую точку экрана слева Up или Down попала другая частица. Возможность изменения наших знаний при наблюдении, в соответствии с постулатом о скачке Дирака, превращает волну (нелокальный объект) в частицу (локальный объект), вследствие чего распределение на втором экране будет соответствовать пролету частиц через две щели. Если первый экран убрать, то частицы будут проходить через две щели как волны и на втором экране будет наблюдаться распределение, соответствующая картине интерференции

квантовой механики против отказа от реализма. Для обоснования отказа от реализма были предложены специальные теоремы, известные как no-go theorems или no-hidden-variables theorems [22]. Второе название более известно, хотя первое название, означающее, что реалистическое описание не проходит, является более правильным.

No-go theorems фон Неймана

Проблема no-go theorems не является достаточно известной. В частности мало известно, что немецкий математик и философ Грета Герман еще в 1935 году [23] указала на явную ошибку в доказательстве no-go theorems, предложенной фон Нейманом в 1932 году [20]. Известный специалист по основам квантовой механики Дэвид Мермин выражает удивление в связи с этим в разделе III – Von Neumann’s silly assumption статьи [22]: «Про-

шло треть века прежде чем Джон Белл обнаружил заново в 1966 году тот факт, что доказательство фон Неймана невозможности теории скрытых параметров основано на предположении, которое можно описать только как глупое – в действительности настолько глупое, что приходится удивляться, изучал ли это доказательство кто-либо из студентов или тех, кто ссылался на него». При этом Мермин ссылается на интервью Джона Белла 1988 года, в котором Белл назвал доказательство фон Неймана глупым: «You may quote me on that: The proof of von Neumann is not merely false but foolish!» [22].

В своей первой статье, посвященной основам квантовой механики [24], Белл замечает, что требования фон Неймана к теории скрытых параметров «являются разумными, только когда результаты измерений неявно идентифицируются со свойствами изолированных систем. Но они выглядят совсем необоснованными, если вспомнить утверждение Бора [25] о том, что „Поведение атомных объектов невозможно резко отграничить от их взаимодействия с измерительными приборами, фиксирующими условия, при которых происходят явления“».

Теория скрытых параметров

Объяснив в начале статьи 1981 года «Носки Берглманна и сущность реальности» парадоксальность эффекта Штерна – Герлаха [26], Джон Белл написал: «Из-за явлений подобного рода среди физиков возник скепсис относительно возможности создания непротиворечивого пространственно-временного описания процессов, происходящих на атомном и субатомном уровнях» [15]. Чтобы оправдать этот отказ от описания реальности сторонники квантовой механики, как писал Белл, «стали утверждать, что атомы и субатомные частицы не имеют определенных параметров, кроме тех, что наблюдаются. Не существует, например, определенного значения параметра, по которому можно было бы различить частицы, приближающиеся к анализатору Штерна – Герлаха, до отклонения их траектории вверх или вниз» [15].

На частицы, обладающие магнитным моментом p_m в неоднородном магнитном поле, действует сила

$$F = p_m dB / dz \cos \theta = F_0 \cos \theta, \quad (1)$$

направленная вдоль градиента магнитного поля dB / dz и пропорциональная косинусу угла θ между направлениями магнитного момента и градиента магнитного поля, направленного в (1) вдоль z . Поэтому частицы с одинаковым p_m , пролетающие с одинаковой скоростью через анализатор Штерна – Герлаха, в котором на некотором длине имеется

градиент dB/dz , должны отклониться на угол зависящий от $\cos \theta$ и на экране частицы должны попадать в полосу вдоль z , длина которой ограничена неравенством $+1 \geq \cos \theta \geq -1$. Атомы должны попадать в любые точки этой полосы, если ориентация p_m , то есть угол θ , может быть любым. Эффект Штерна – Герлаха свидетельствует о том, что p_m атомов всегда ориентирован вдоль градиента магнитного поля $\theta = 0$, $\cos \theta = +1$ или против него $\theta = \pi$, $\cos \theta = -1$. Парадоксальность этого эффекта в том, что мы можем выбрать любое направление градиента магнитного поля, просто повернув анализатор Штерна – Герлаха [15].

Создатели квантовой механики, решив, что этот парадокс невозможно описать реалистично, решили ограничиться описанием вероятности наблюдения дискретных значений, $+1$ и -1 для проекций спина $1/2$ на разные направления. Согласно формализму квантовой механики [27], для любого спинового состояния есть такое направление z_0 для которого данное состояние является собственным $\psi_A = |\uparrow_0\rangle$, то есть измерение проекции в этом направлении дадут результат спин-вверх с вероятностью 1. Вероятность наблюдения в любом другом направлении z_1 может быть определена с помощью операторов поворота [27]. Выбрав ось y перпендикулярно плоскости образованной осями z_0 и z_1 и используя оператор поворота вокруг y [27], находим, что состояние, собственное для z_0 , описывается суперпозицией состояний

$$\psi_A = \cos(\varphi/2) |\uparrow_1\rangle + \sin(\varphi/2) |\downarrow_1\rangle \quad (2)$$

для направления z_1 , где φ – угол между z_0 и z_1 . При наблюдении проекции вдоль z_1 суперпозиция (2) превращается, как постулировал Дирак, в собственное состояние $\psi_A = |\uparrow_1\rangle$, под воздействием сознания наблюдателя.

В случае эффекта Штерна – Герлаха, как справедливо заметил Белл [15], создатели квантовой механики поспешили отказаться от реализма. Для описания этого эффекта Белл предложил в статье [15] заменить выражение (1) на выражение

$$F = F_0 \cos \theta / |\cos \theta|, \quad (3)$$

в котором сила, действующая на частицы в анализаторе Штерна – Герлаха, имеет только два значения: $F = +F_0$, когда $\cos \theta > 0$ и $F = -F_0$ когда $\cos \theta < 0$.

Белл признает: «Для создания полной теории потребовалось бы, например, рассмотрение поведения скрытых параметров при самом процессе измерения» [24]. Но он

делает важное замечание, объясняющее смысл теории скрытых параметров и почему параметры являются скрытыми: «Со скрытыми параметрами или без них анализ процесса измерения приводит к специфическим трудностям» [24]. Возможность теории со скрытыми параметрами обосновывается квантовым постулатом Бора, согласно которому «всякое наблюдение атомных явлений включает такое взаимодействие последних со средствами наблюдения, которым нельзя пренебречь» [28].

Состояние частиц ЭПР-пары творится сознанием наблюдателя

Описание квантовых явлений с использованием суперпозиции состояний (2) предполагает отказ от реализма, так как в таком описании предполагается, что результат наблюдения не определяется параметрами, существующими вне сознания наблюдателя, в отличие от теории скрытых параметров (3). Но спиновые состояния не запутанных частиц (2) существуют в пространстве в том смысле, что к ним применимы операторы поворота и поэтому они не противоречат нашим априорным представлениям об изотропности пространства. К запутанным частицам, например к спиновым состояниям частиц ЭПР-пары

$$\psi_{EPR} = (|\uparrow_A(r_A) \downarrow_B(r_B)\rangle + |\downarrow_A(r_A) \uparrow_B(r_B)\rangle) / \sqrt{2}, \quad (4)$$

операторы поворота неприменимы. Поэтому мы не можем думать, что они существуют в пространстве до наблюдения. Синглетное состояние двух частиц (4) – это не состояние двух частиц A и B

$$\begin{aligned} \psi_A \psi_B = |\uparrow_{A0}\rangle |\downarrow_{B0}\rangle = & (\cos(\varphi/2) |\uparrow_{A1}\rangle + \sin(\varphi/2) |\downarrow_{A1}\rangle) \times \\ & \times (-\sin(\varphi/2) |\uparrow_{B1}\rangle + \cos(\varphi/2) |\downarrow_{B1}\rangle), \end{aligned} \quad (5)$$

состояния которых являются собственными в одном направлении z_0 . В случае (5), в отличие от (4), понятие вверх и вниз имеет условный, но определенный смысл: \uparrow_0 – это вверх вдоль z_0 , а \uparrow_1 – это вверх вдоль z_1 . Выражение (4) описывает не что-то, находящееся в пространстве, даже в том смысле как это делают выражения (2) и (5), а состояние сознания наблюдателя, который знает, что частицы находятся в синглетном состоянии. Состояние частиц ЭПР-пары (4) в пространстве появляются после наблюдения. Например, при наблюдении Алисой отклонения частицы A в ее анализаторе, направленном вдоль z_0 вверх, появляются пространственные состояния обеих частиц (5).

Неравенства Белла

Из этого, а также из работ Белла, очевидно, что на квантовом постулате Бора и его принципе дополненности основана теория скрытых параметров, а не квантовая механика, вопреки тому, что написано в учебниках и как многие думают. В теории скрытых параметров до наблюдения существует параметр, например угол θ между направлениями спина и градиента поля в (3), по которым можно различить частицы *до отклонения их траектории вверх или вниз*. Эти параметры являются скрытыми из-за взаимодействия частиц с измерительным прибором, которое постулировал Бор. Именно это взаимодействие, которое невозможно описать, позволило Беллу написать странное выражение (3) для силы. Измерительный прибор может изменить параметры, но он не может их создать. Параметры и квантовые состояния (5) может создать только сознание наблюдателя. Оно может создать их потому, что согласно интерпретации Борна, квантовые состояния (2), (4), (5) описывают вероятность наблюдения, а не что-то реальное.

Неравенства Белла являются одним из способов отделить воздействие сознания наблюдателя от воздействия бездушного прибора. Этот способ основан на том, что любое воздействие прибора должно быть локальным, в то время как воздействие сознания наблюдателя нелокально. Поэтому важно подчеркнуть, что единственное условие, используемое при выводе неравенства Белла, это «*требование локальности, согласно которому результат измерения одной системе не может мгновенно повлиять на результат измерений отдаленной системе*» [6]. Белл предложил в статье [15] простой пример вывода неравенства Белла. Белл начал с тривиального неравенства

$$P_{0+}P_{45-} + P_{45+}P_{90-} \geq P_{0+}P_{90-}, \quad (6a)$$

в котором P_{0+} , P_{45-} , P_{45+} , и P_{90-} – это вероятности отклонения вверх (+) и вниз (-) при разной ориентации анализатора под углами $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$ относительно некоторого направления. Неравенство (6a) очевидно. Когда вероятности P_{0+} , P_{45-} , P_{45+} , и P_{90-} измеряются в одном спиновом состоянии, любая частица, которая отклониться вверх при $\theta = 0^\circ$ и вниз при $\theta = 90^\circ$ (увеличив третью вероятность $P_{0+}P_{90-}$ в (6a)), при ориентации $\theta = 45^\circ$ может отклониться вверх (увеличив вторую вероятность $P_{45+}P_{90-}$ в (6a)) или вниз (увеличив первую вероятность $P_{0+}P_{45-}$ в (6a)). Неравенство (6a) не может служить для выявления противоречия квантовой механики с реализмом, так как без требования локальности

нельзя измерить вероятности P_{0+} и P_{45-} в одном состоянии. При измерении вероятности P_{0+} состояние частиц может быть изменено как сознанием наблюдателя, так и бездушным прибором. В обоих случаях нельзя будет измерить P_{45-} в том же состоянии, что P_{0+} . Вероятности при различной ориентации анализаторов θ и φ могут быть измерены в одном состоянии с помощью ЭПР-пары (4), если выполняется требование локальности. Благодаря ЭПР-корреляции должно иметь место равенства $P_{\theta A+} = P_{\theta B-}$ и $P_{\theta A-} = P_{\theta B+}$ для любой ориентации, включая $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$ и $\theta = 90^\circ$. Неравенство Белла

$$P_{0A+}P_{45B+} + P_{45A+}P_{90B+} \geq P_{0A+}P_{90B+} \quad (6b)$$

выводятся из очевидного неравенства (6a) при единственном условии: вращение анализатора А, расположенного в области r_A не может мгновенно изменить спиновое состояние отдаленной частицы В, расположенной в области r_B и наоборот.

Квантовая механика предсказывает нарушение неравенства Белла (6b), так как согласно постулату Дирака и ЭПР-корреляции, наблюдатель А, Алиса творит состояния обеих частиц (5), наблюдая отклонение своей частицы вверх с вероятностью, согласно (4), $(1/\sqrt{2})^2 = 1/2$. Вероятность того, что второй наблюдатель Боб будет наблюдать отклонение своей частицы вверх в сотворенном Алисой состоянии равна $P_{\theta B+} = |\sin(\varphi/2)|^2$, где $\varphi = \theta_B - \theta_A$ – угол между ориентациями анализаторов Алисы θ_A и Боба θ_B . Поэтому $P_{\theta A+}P_{\theta B+} = 0,5|\sin(\varphi/2)|^2$. Чтобы измерить вероятность $P_{0A+}P_{45B+}$ Алиса должна направить свой анализатор под углом $\theta_A = 0^\circ$, а Боб – под углом $\theta_B = 45^\circ$. Эта вероятность, согласно квантовой механики, будет равна $P_{0A+}P_{45B+} = 0,5\sin^2(45^\circ/2) \approx 0,0732$, так как угол между анализаторами равен $\varphi = \theta_B - \theta_A = 45^\circ$. Вероятность во втором слагаемом (6b) должна быть такой же $P_{45A+}P_{90B+} = 0,5\sin^2(45^\circ/2) \approx 0,0732$, так как $\varphi = 90^\circ - 45^\circ = 45^\circ$. Сумма с левой стороны неравенства (6b) должна быть равна 0,1464, в то время как для члена в правой стороне неравенства квантовая механика предсказывает большую величину вероятности $P_{0A+}P_{90B+} = 0,5\sin^2(90^\circ/2) \approx 0,25$. Неправильное неравенство

$$0,1464 \geq 0,25 \quad (6c)$$

получается вследствие скачка Дирака, согласно которому сознание Алисы творит состояние как своей частицы, так и частицы Боба. Следует подчеркнуть, что для вывода неравенства Белла (6b) не требуется предположения о существовании скры-

тых параметров. Поэтому распространенное мнение, что неравенства Белла позволяют экспериментально опровергнуть теорию скрытых параметров и подтвердить справедливость квантовой механики, является необоснованным. В данном случае верно название no-go theorems, но не no-hidden-variables theorem.

ОТКАЗ ОТ РЕАЛИЗМА И ИДЕЯ КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА

Экспериментальные свидетельства нарушения неравенств Белла сыграли решающую роль в появлении идеи квантовых вычислений, так как они были интерпретированы как наблюдения ЭПР-корреляции. Ален Аспе, французский экспериментатор, одним из первых получивший надежные свидетельства [10] нарушения неравенств Белла, утверждает в недавней публикации [29], что очередное экспериментальное подтверждение тремя группами [30–32] нарушения неравенств Белла одновременно заставляет отказаться от локального реализма и открывает дверь новым квантовым информационным технологиям. В этом утверждении имеется логическое противоречие: как можно что-то сделать, если ничего нет вне сознания наблюдателя.

Идея квантового компьютера и ортодоксальная квантовая механика

Это противоречие означает, что вопреки почти всеобщей уверенности квантовый компьютер нереален согласно ортодоксальной квантовой механики. Запутанные состояния, как было показано выше, могут существовать только в сознании наблюдателя. Именно с этим связан экспоненциальный рост числа независимых переменных с числом запутанных кубитов. Наше сознание в определенном смысле богаче нашего достоверного опыта. Мы можем представить любое число, например 10^{500} , по сравнению с которым число атомов 10^{80} в известной нам вселенной ничтожно мало. Мы можем поставить задачу разложить это число на простые множители, используя алгоритм Шора. Но чтобы решить эту задачу мы должны иметь ресурсы вне нашего сознания. Поэтому утверждение Дэвида Дойча о необходимости существования множества параллельных вселенных для реальности квантового компьютера является обоснованным.

Иллюзия, что можно обойтись без этого, возникла из-за непонимания того, что запутанные состояния, например N квантовых битов

$$\psi = \gamma_1 |\uparrow\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle + \gamma_2 |\uparrow\uparrow\uparrow\dots\downarrow\rangle + \dots + \gamma_{g_N-1} |\downarrow\downarrow\downarrow\dots\uparrow\rangle + \gamma_{g_N} |\downarrow\downarrow\downarrow\dots\downarrow\rangle \quad (7)$$

описывают состояние сознания наблюдателя. Число $g_N = 2^N - 1$ независимых переменных γ_i увеличивается экспоненциально с числом кубитов N , так как для запутанных состояний есть только одно условие нормировки $|\gamma_1|^2 + |\gamma_2|^2 + |\gamma_{g_N-1}|^2 + |\gamma_{g_N}|^2 = 1$ на все N кубитов, а не на каждый кубит. Именно это экспоненциальное увеличение числа независимых переменных привлекло к идеи квантовых вычислений столь большое внимание: система всего из $N \approx 1000$ квантовых битов описывается числом независимых переменных $2^N - 1 \approx 2^{1000} - 1 \approx 10^{301}$ по сравнению с которых число атомов во всей видимой вселенной 10^{80} ничтожно мало. Но это огромное число уменьшается в два раза, то есть на столь же большое число, после наблюдения состояния всего одного кубита. Такое всемогущество сознания наблюдателя, постулируемое квантовой механикой, приводит к логическому абсурду.

Теория Эверетта

Теория множества параллельных вселенных, существование которых Дэвид Дойч считает условием реальности квантового компьютера, была предложена в 1957 году американским ученым Хью Эвереттом [33], чтобы устранить психологию из описания квантовых явлений. В начале статьи он написал, что из-за Процесса 1 «В обычной формулировке КМ нельзя обойтись без внешнего воздействия наблюдения на систему» и что «вопрос не может быть решен вне области психологии» [33]. Вопреки распространенному мнению теорию Эверетта нельзя считать интерпретацией квантовой механики, так как у них разные предметы описания. Ортодоксальная квантовая механика описывает состояние сознания наблюдателя и его воздействие на квантовое состояние, в то время как теория Эверетта описывает реальное, то есть независящее от сознания наблюдателя, состояние множества параллельных вселенных. Вряд ли можно сказать, что это описание является полным и непротиворечивым. Но можно согласиться с Дойчем, что это описание является менее абсурдным, чем ортодоксальная квантовая механика, в которой физика перепутана с психологией. Дойч уверен, что «чтобы узнать, что параллельные вселенные существуют, нам не нужны глубокие теории: об этом нам говорят явления интерференции одной частицы», так как он понимает, что ортодоксальное описание этого явления обманчиво, так как «предполагает некоторое психокинетическое влияние сознательного «наблюдателя» на

основные физические явления, хотя такого влияния не существует» (см. Главу 2 «Тени» книги [13]).

Сверхпроводящие кубиты и макроскопический реализм

Идея сверхпроводящих кубитов противоречит макроскопическому реализму, так как сверхпроводимость является макроскопическим квантовым явлением, а идея квантового компьютера противоречит реализму. Сомнения в макроскопическом реализме впервые были высказаны Энтони Леггеттом более тридцати лет назад [34]. Это сомнение предполагает, что состояние сверхпроводящего контура с переходами Джозефсона должно описываться суперпозицией состояний, как и спиновые состояния (2). Такой контур сейчас рассматривают как persistent-current qubit [35] или flux qubit [36] (поточковый кубит). В теории поточкового кубита предполагается суперпозиция двух состояний с противоположно направленным током I_p , которые имеют одинаковую энергию, когда магнитный поток $BS = \Phi_e$ внутри контура площадью S кратен половине $\Phi_e = (n + 0,5)\Phi_0$ кванта потока $\Phi_0 = 2\pi\hbar/q$ [37]. Поточковый кубит рассматривается в качестве аналога спина 1/2 [38] и суперпозицию его состояний описывают [39] выражением

$$\psi_{fq} = \alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle, \quad (8)$$

подобным выражению (2) для спина 1/2.

Так как использование суперпозиции (8) в описании квантовых явлений противоречит реализму, оно должно быть обосновано no-go theorems. Единственной такой теоремой, предложенной для сверхпроводящих систем, являются неравенства Леггетта – Гарга [34]. Автор [40] утверждает, что эти неравенства и экспериментальные результаты, полученные на сверхпроводящих кубитах [41], позволили опровергнуть макроскопический реализм, то есть доказать, что Луны нет, когда ее никто не видит. В статье утверждается [42], что результаты измерений поточкового кубита свидетельствуют о суперпозиции макроскопических квантовых состояний. Обоснованность этих утверждений будет рассмотрена в следующем разделе. Здесь мы обратим внимание на противоречие предположений, сделанных при выводе неравенства Леггетта – Гарга в [34] и теории поточкового кубита с основами квантовой механики и законами сохранения.

Выражение для суперпозиции проекций спина 1/2 вдоль z_1 (2) совпадает с (8) при $\alpha = \cos(\varphi/2)$

и $\beta = \sin(\varphi/2)$, что подразумевает собственное состояние поточкового кубита вдоль z_0 , так как квантовая механика постулирует соотношение неопределенности сопряженных величин. В случае магнитного момента, которым обладают как спин, так и поточковый кубит, сопряженными величинами являются проекции момента на разные направления. Измерения проекции момента поточкового кубита $M_m = I_p S$ в направлении перпендикулярном его плоскости дают с одинаковой вероятностью $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$ при внешнем поле соответствующем $\Phi_e = (n + 0,5)\Phi_0$ [43]. Это означает, что $|\alpha|^2 = |\cos(\pi/4)|^2 = |\beta|^2 = |\sin(\pi/4)|^2 = 1/2$, угол между z_0 и z_1 равен $\varphi = \pi/2$ и, следовательно, собственное состояние поточкового кубита должно в этом случае соответствовать направлению лежащему в его плоскости. Так как поточковый кубит является аналогом спина 1/2 измерение в этом направлении должно давать значение проекции $M_m = +I_p S$ с вероятностью 1. Никто не пытался измерять проекцию магнитного момента в этом направлении, так как хорошо известно, что его проекция в плоскости контура с током равна нулю. Интерпретация результатов измерений двух состояний $M_m = +I_p S$ и $M_m = -I_p S$, как следствие их суперпозиции (8), противоречит также постулату о скачке Дирака, так как последовательные измерения одной динамической переменной дают разные результаты [43].

Идея поточкового кубита противоречит также фундаментальному закону сохранения момента импульса [44, 45], так как два его состояния имеют момент импульса $M_p = (2m_e/e)I_p S \approx +0,5 \cdot 10^5 \hbar$ и $M_p \approx -0,5 \cdot 10^5 \hbar$, различающийся на макроскопическую величину $10^5 \hbar$. Предположение о суперпозиции таких состояний означает, что магнитный момент может измениться на макроскопическую величину $10^5 \hbar$ сам по себе, беспричинно, без взаимодействия с окружением. Теория поточкового кубита противоречит также принципу работы электродвигателя, так как в ней не учитывается энергия $E_M = -M_m B$ магнитного момента $M_m = I_p S$ контура с током I_p во внешнем магнитном поле $B = (n + 0,5)\Phi_0/S$ [46].

МОЖНО ЛИ ОПРОВЕРГНУТЬ РЕАЛИЗМ?

Долгое время только немногие, Эйнштейн, Шредингер, Эверетт, Белл и др., обращали внимание на противоречие квантовой механики с реализмом. Большинство эту проблему игнорировало, или не понимало ее смысл. Позиция большин-

ства выражена в статье [47], о которой Белл писал в [48]: «Эта статья особенно выделяется своим здравым смыслом. Автора шокируют „...такие ошеломляющие фантазии как многомировая интерпретация...“ ([47] 98). Он отвергает утверждения фон Неймана, Паули, Вигнера, что описание „измерения“ не может быть полным без включения в него сознания наблюдателя: „...Я нахожу трудным для понимания, что тот, кто приходит к таким выводам, не ищет ошибку в своих аргументах“ ([47] 101). Для вК „... сознание наблюдателя здесь ни при чем... квантовое измерение завершается, когда результат записан макроскопическим прибором...“ ([47] 101)». Про сознание наблюдателя особенно трудно понять физикам советской школы, так как в советское время было запрещено открыто обсуждать проблему противоречия квантовой механики с реализмом. Проблема стала более широко известна благодаря неравенствам Белла, которые согласно распространенному мнению позволяют экспериментально определить от чего мы должны отказаться, от квантовой механики или от реализма. Эта проблема приобрела практическое значение, так как, как справедливо заметил Алан Аспе [29], дверь к новым квантовым информационным технологиям открывается отказом от локального реализма.

Что утверждает реализм

Для осознанного решения вопроса от чего мы должны отказаться необходимо понимать, что такое реализм. Реализм утверждает, что наблюдаемое существует независимо от наблюдения и до наблюдения. Например, как хотел думать Эйнштейн, Луна существует когда ее никто не видит. Для Эйнштейна реализм – это предпосылка «любой разновидности физического мышления» [49], а не утверждение, которое можно опровергнуть с помощью экспериментальных результатов. В этом же состоит смысл первого возражения Шредингера против квантовой механики: «Я не считаю, что глубокое философское размышление об отношении субъекта и объекта и об истинном значении отличий между ними зависит от количественных результатов физических или химических измерений» [20]. Если «объект не существует независимо от наблюдающего субъекта», как «имеют в виду Бор, Гейзенберг и их последователи» [20], то необходимо описать, каким образом изменение состояния субъекта может повлиять на состояние объекта. Сделать это представляется невозможным, особенно когда один объект наблюдается двумя субъектами.

Проблема свободы воли

Алиса, наблюдая отклонения вверх вдоль z_0 одной из частиц ЭПР пары (4) сотворит своим сознанием пространственные состояния двух частиц (5). В то время как второй субъект Боб сотворит другие состояния

$$\psi_A \psi_B = |\uparrow_{A1}\rangle |\downarrow_{B1}\rangle = (\cos(\varphi/2) |\uparrow_{A0}\rangle - \sin(\varphi/2) |\downarrow_{A0}\rangle) \times (\sin(\varphi/2) |\uparrow_{B0}\rangle + \cos(\varphi/2) |\downarrow_{B0}\rangle), \quad (9)$$

когда он увидит отклонение второй частицы ЭПР пары вниз вдоль z_1 . Алиса будет думать, что частицы после наблюдения находятся в состоянии (5), а Боб в (9). Обладая свободой воли, Алиса и Боб могут выбрать любые направления z_0 и z_1 и сотворить разные состояния. Проблема свободы воли наблюдателя, возникающая в квантовой механике вследствие отказа от реализма, обсуждается в ряде работ, в частности известных математиков из Принстонского университета [50] и докладе Лауреата Нобелевской премии по физике Герарда 'т Хоофта, представленном в 2011 году на Общем собрании РАН [51]. В этом докладе [51] отмечается, что «Противоречия с неравенствами Белла возникают, когда наблюдатель может выбирать между наборами взаимно не коммутирующих измеряемых величин» [51]. Хоофт цитирует одного из авторов теоремы о свободе воли [50]: «Математик Конвей в ходе интервью восклицает: „Мы должны верить в свободу сделать всё, что угодно. Я верю, что у меня есть свобода выпить эту чашку кофе или бросить её в другой конец комнаты. Я верю, что у меня есть свобода давать это интервью или не давать“» [51]. И выражает свое несогласие с ним: «Но, конечно, Конвей должен знать, что, несмотря на эту видимую свободу бросить чашку кофе в другой конец комнаты, то, что он в действительности сделает, определяется законами физики, а не какой-то загадочной, не установленной „свободой воли“» [51]. Такое решение проблемы вряд ли можно считать приемлемым. Представим, что математик Конвей действительно бросил чашку кофе и попал кому-то в глаз. Все возмущены: «Вы хулиган! Вас надо судить». На что математик Конвей мог бы ответить: «Я не виноват, и меня нельзя судить, так как все мои действия определяются законами физики. Спросите Нобелевского лауреата Хоофта».

Эйнштейн был прав!

В споре между Эйнштейн и Бором большинство физиков всегда были на стороне Бора. Убеждение в том, что Эйнштейн был не прав, укрепилось [29]

после экспериментальных свидетельств нарушения неравенств Белла [10, 30–32]. Один из членов редколлегии Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS), которого цитирует на с. 155 автор книги «Эйнштейн был прав!» [52], оценивает число сторонников «ереси», которые сомневаются в возможности «мистического действия на расстоянии» примерно в 10%. Возможно их процент даже меньше. Но абсурд со свободой воли наблюдателя и другие проявления абсурда, которые логически следуют из отказа квантовой механики от реализма, свидетельствуют о том, что прав Эйнштейн и меньшинство. Эйнштейн был прав утверждая, что реализм «является предпосылкой любой разновидности физического мышления» [49]. Он предупреждал, что мы не должны отказываться от представления, что «Существует нечто вроде „реального состояния“ физической системы, существующего объективно, независимо от какого бы то ни было наблюдения или измерения», так как «Если отбросить этот произвольный тезис о реальности, рассматриваемый в чисто логическом плане, то будет весьма трудно избежать солипсизма» [53]. Избежать солипсизма, согласно которому существует только один наблюдатель, действительно оказалось возможным только тем сомнительным способом, который предлагает 'т Хоофт [51], то есть отрицая свободу воли человека.

Реализм опровергают наивные реалисты

Эйнштейн прав, так как даже авторы [29–32, 54–56], опровергающие локальный реализм, не могут отказаться от реализма, как «предпосылкой любой разновидности физического мышления». Эйнштейн хотел думать, что Луна существует, когда он на нее не смотрит, в то время как авторы [29–32, 54–56] уверены, что частицы ЭПР-пары (4) существуют до наблюдения. Мы можем думать, что Луна существует до наблюдения, но мы не можем думать, что частицы ЭПР-пары (4) существуют до наблюдения, так как это противоречит нашим априорным представлениям о трехмерном изотропном пространстве (см. выше раздел «Состояние частиц ЭПР пары творятся сознанием наблюдателя»). Поэтому, при анализе экспериментов по проверке неравенств Белла [30–32, 54–56] нельзя рассматривать корреляцию между результатами измерений двух частиц, как это делают наивные реалисты, а следует рассматривать корреляцию между двумя событиями, например одновременными. Но одновременность событий, разделенных в пространстве относительна, согласно специальной теории

относительности Эйнштейна. Если авторы [29–32, 54–56] рассматривают пары событий одновременных в системе отсчета Земли и наблюдают ЭПР-корреляцию, то в системе Солнца они должны рассматривать другие пары событий между которыми ЭПР корреляция наблюдаться не должна. Поэтому прав был Белл, для которого нарушение его неравенств свидетельствовало о противоречии между любой строгой формулировкой квантовой механики и теорией относительности, а не большинство авторов, которые думают, что это нарушение опровергает реализм и открывает дверь к новым квантовым информационным технологиям. На проблему идентификации пар событий в экспериментах по проверке неравенств Белла обращается внимание в статье [57].

Реалистическое описание большинства квантовых явлений

Отказ от реализма связан с принятым пониманием волновой функции Шредингера, как описания вероятности наблюдения, предложенным Борном. Поэтому важно обратить внимание на то, что большинство квантовых явлений может быть описано при использовании реалистического понимания волновой функции, как описания реальной плотности, предложенной изначально Шредингером [58]. На возможность реалистического описания сверхпроводящих явлений обратил внимание Ричард Фейнман в Главе 19 «Уравнение Шредингера в классическом контексте. Семинар по сверхпроводимости» своих знаменитых лекций по физике [59]. В начале параграфа 4 «Смысл волновой функции» он утверждает, что Шредингер «неправильно решил, что $|\Psi|^2$ это плотность электрического заряда электрона ... Борн правильно (насколько нам известно) отождествил Ψ в уравнении Шредингера с амплитудой вероятности...». Но далее Фейнман заметил, что «когда Ψ – волновая функция каждой из огромного числа частиц, поголовно пребывающих в одном и том же состоянии то в этом случае $|\Psi|^2$ можно отождествлять с плотностью частиц». Реалистическое описание возможно не только в случае макроскопических квантовых явлений, но и в других случаях, когда в описании нет акта наблюдения, то есть Процесса 1, в котором физика перепутана с психологией.

Реалистическое описание макроскопических квантовых явлений означает, что противоречие квантовой механики с макроскопическим реализмом является необоснованной выдумкой, появившейся вследствие ложного понимания квантовой механики как универсальной теории, одинаково

описывающей все квантовые явления. Это также ставит под сомнение идею сверхпроводящих кубитов. Авторы [34] выдумали волновую функцию, которая изменяется при наблюдении, в дополнение к той, которая описывает реальное состояние сверхпроводящего контура и не может изменяться при наблюдении. Для этого нет никаких оснований. Как справедливо заметил автор [60], аналогия между неравенствами Белла и неравенством Леггетта – Гарга вводит в заблуждение, так как при выводе последних не используется требование локальности. Без этого требования невозможно отличить воздействие сознания наблюдателя от воздействия бездушного измерительного прибора. Неравенства Леггетта – Гарга являются аналогом no-go theorems не Белла, а фон Неймана. Только с той разницей, что для описания квантовых эффектов наблюдаемых в сверхпроводящих структурах не нужно использовать неопределенность результата воздействия средств наблюдения и на этом основании писать странные формулы, подобные (3), которые Белл должен был использовать для реалистического описания эффекта Штерна – Гердаха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сомнение в реальности квантового компьютера вызывает, прежде всего, отсутствие непротиворечивой теории квантовых явлений. Мы не понимаем почему наблюдаются нарушения неравенств Белла, как мы некогда не понимали почему наблюдается дуализм волна-частица в экспериментах по интерференции на двух щелях. Иллюзия понимания господствовала долгие годы благодаря уловке. Шредингер считал свою волновую механику неудавшейся теорией. Он писал в 1951 году: «*Это можно назвать „запасным выходом“, хотя изначально предполагалось, что это будет новая теория. Разумеется, я имею в виду квантовую механику. (Эддингтон отозвался о ней так: „не физическая теория, а уловка – очень хорошая уловка“)*» [20]. Уловкой является предложение Борна считать волновую функцию Шредингера описанием вероятности наблюдения. Эта уловка относится не к тому, как устроен внешний мир, а к тому, как мы думаем. Мы не можем думать, что реальная плотность может измениться при наблюдении, и мы знаем из опыта, что вероятность наблюдения изменяется при наблюдении.

Критики квантовой механики, Эйнштейн, Шредингер, Белл и немногие другие понимали, что эта уловка перепутала физику с психологией и означает отказ от реализма, так как вероятность

наблюдения изменяется в сознании наблюдателя. Но большинство физиков не хотело понимать последствий отказа от реализма из-за поражающей успешности квантовой механики, в которой не сомневались даже ее критики. Джон Белл говорил в 1989 году: «*Когда они вынуждены признать некоторую двусмысленность привычных формулировок, они, тем не менее, продолжают настаивать, что общепризнанная квантовая механика прекрасно работает „во всех практических случаях“*» [48]. И соглашается с этим: «*Я согласен с этим: общепризнанная квантовая механика (насколько я знаю), прекрасно работает во всех практических случаях*» [48]. В статье [61] обращается внимание на то, что Белл был не прав в этом случае. Квантовая механика не может описать даже эффект Зеемана. Иллюзия успешности квантовой механики господствует длительное время в частности потому, что ее создатели, подгоняя под ответ, как нерадивые школьники, не заметили, что ответы должны быть разными. Разные квантовые явления, такие как эффект Зеемана и эффект Ааронова – Боме нельзя описать, используя одно определение гамильтониана и не сделав математической ошибки [61].

Ошибка была сделана в [27] и других учебниках, но ее не замечали, так как для большинства квантовая механика – это предмет веры, а не критического анализа. Эйнштейн предугадал такое отношение в своем письме Шредингеру 1928 года [62]: «*Успокаивающая философия – или религия? – Гейзенберга и Бора есть нечто вроде искусной западни, которая предлагает верующим мягкую убаюкивающую подушку, от которой им не легко будет оторваться. Поэтому не будем их тревожить. ... Эта религия меня мало интересует*» (см. цитату на стр. 116 в книге [63]). В квантовую механику верят благодаря грандиозному прогрессу в технологии, связанному с ней. История квантовой механики свидетельствует о том, что прогресс в технологии не обязательно сопровождается прогрессом в понимании. Напротив, прогресс в технологии может провоцировать регресс в понимании вследствие недостаточно критического отношения к теории, с которой связывается этот прогресс. Хосе Ортега-и-Гассет, которого Шредингер рекомендовал как великого испанского философа [20], указал причину наблюдаемого регресса в понимание, которую он назвал «варварством специализации»: «*Непосредственным же результатом узкой и ничем не восполненной специализации стало то, что сегодня, когда „людям науки“ нет числа, людей „просвещенных“ намного меньше, чем, например, в 1750 году*» [64]. Кого он относил к «просвещенным» понятно из

следующей цитаты, взятой из его книги «Восстание масс», опубликованной в 1930 году: «Ньютон сумел создать свою научную систему, не слишком углубляясь в философию, но Эйнштейну для его изоциренного синтеза пришлось пропитаться идеями Канта и Маха. Кант и Мах – всего лишь символы той огромной массы философских и психологических идей, что повлияли на Эйнштейна, – помогли освободиться его разуму и найти путь к обновлению. Но одного Эйнштейна мало. Физика испытывает самый тяжелый за всю свою историю кризис, и спасти ее сможет только новая энциклопедия, намного систематизированней прежней» [64].

Ортега-и-Гассет точно указал причину кризиса физики, проявившегося в непонимании последствий противоречия квантовой механики с реализмом. Объясняя в 1949 году причины своего отрицательного отношения к квантовой механике, Эйнштейн обращался к философии Канта: «Сущность идей Канта можно было бы сформулировать так: „Реальность не дана нам, а задана (так же, как задают загадки)“» [49]. Кант предпринял критику разума, чтобы «устранить скандал противоречия разума с самим собой». Стремление создателей квантовой механики любой ценой описать парадоксальные квантовые явления привели к противоречию разума с самим собой [65] и даже к математической ошибке [61]. Поэтому философия Канта важна для понимания причин заблуждения относительно квантовой механики. Анализируя познавательные способности нашего разума, Кант пришел к выводу, что мы знаем только наши представления о внешнем мире, но не сам мир как вещь-в-себе. Наши представления о мире могут изменяться (как, например, в вопросе о вращении Земли или Солнца), но мир как вещь-в-себе при этом не изменяется. Эйнштейн отстаивал не этот реализм вещи-в-себе, а реализм в наших представлениях. Реальность в представлениях не дается, а задается, как задают загадки. Наши представления о реальности, согласно Канту, формируются не только на основе наблюдаемых явлений, но и априорных знаний. К априорным знаниям, которые не следуют из опыта, а являются предпосылкой опыта, относится представление, что изменение наших знаний о предмете наблюдения не может повлиять на состояние этого предмета. Эйнштейн отстаивал этот реализм, от которого отказались создатели квантовой механики, как условие познаваемости мира.

Кант ввел понятие о вещи-в-себе, как непознаваемой причине явлений, чтобы избежать про-

тиворечия разума с самим собой, в частности для преодоления противоречия между наличием свободы воли у человека и детерминизмом в наших представлениях о природе. Грета Герман, указавшая в 1935 году на ошибку в доказательстве по-го theorems фон Неймана, пыталась убедить Гейзенберга и Карла фон Вейцзеккера, что квантовая механика, отказавшись от детерминизма, не может считаться научной теорией: «В философии Канта закон причинности не является эмпирическим утверждением, который можно было бы обосновать или опровергнуть на опыте, а напротив, он есть предпосылка всякого опыта и относится к тем категориям мысли, которые Кант называет „априорными“ ... Так что закон причинности в известном смысле есть орудие нашей мысли, которым мы пытаемся переработать в опыт сырой материал наших ощущений. И лишь в той мере, в какой это удастся, мы обладаем и предметом естествознания. Как же возможно, чтобы квантовая механика собиралась расшатать этот закон причинности и в то же время хотела оставаться естественной наукой?» [3].

Большинство физиков, вслед за Гейзенбергом и фон Вейцзеккером не понимают обоснованности возражений Греты Герман против квантовой механики. Попытка Гейзенберга [3] опровергнуть вывод Канта об априорности принципа причинности на основе эмпирических данных не имеет смысла, так она противоречит самому понятию априорности: знания являющиеся предпосылкой всякого опыта не могут быть опровергнуты с помощью опыта. Мы не можем мыслить беспричинные явления. И если мы отрицаем причину явления вне нашего сознания, как это сделали создатели квантовой механики, то причиной явления становится наше сознание. Шредингер это наглядно продемонстрирован своим известным парадоксом с котом. Кот Шредингера с большим основанием может считаться квантовым битом, чем сверхпроводящие кубиты [66]. Отказ от причинности, как и от реализма приводит к абсурду и никакие экспериментальные результаты не могут спасти квантовую механику от этого абсурда. Этот абсурд наглядно свидетельствует о том, что ЭПР-корреляция и нарушение неравенств Белла свидетельствуют о кризисе физики в большей мере, чем открывают дверь к новым квантовым информационным технологиям.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Валиев К.А., Кокин А.А.** Квантовые компьютеры: надежды и реальность. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». – Москва-Ижевск, 2001.
2. **Гейзенберг В.** О квантовотеоретическом истолковании кинематических и механических соотношений // УФН 1925. Т. 12. С. 574–586; *Zh. Phys.* 1925. V. 33. P. 879–893.
3. **Гейзенберг В.** Часть и целое. – М.: Наука, 1989.
4. **Einstein A., Podolsky B. and Rosen N.** Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? // *Phys. Rev.* 1935 V. 47. P. 777–780; А. Эйнштейн, Б. Подольский и Н. Розен, Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным? // УФН 1936. V. 16. P. 436.
5. **Schrodinger E.** The present situation in quantum mechanics // *Naturwissenschaften* 23, 844–849 (1935).
6. **Bell J.** On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox // *Physics*. 1964. V. 1. P. 195–200.
7. **Bohr N.** Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // *Phys. Rev.* 1935. V. 48. P. 696–702.
8. **Bernstein J.** *Quantum Profiles*. Princeton, 1991.
9. **Нильсен М., Чанг И.** Квантовые вычисления и квантовая информация. – М.: Мир. 2006.
10. **Aspect A., Dalibard J. and Roger G.** Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers // *Phys. Rev. Lett.* 1982. V. 49. P. 1804–1807.
11. **Bell J.** Speakable and unspeakable in quantum mechanics, Introductory remarks at Naples-Amalfi meeting, May 7, 1984. с. 169 в книге [12].
12. **Bell J.** *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics. Collected Papers on Quantum Philosophy*. Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
13. **Дойч Д.** Структура реальности. НИЦ РХД. – Москва-Ижевск, 2001.
14. **Эйнштейн А.** Автобиографические заметки // *Собрание научных трудов*. Т. 4. – М.: Наука, 1967. С. 259–293 (290) *Autobiographisches (Autobiographical Notes)*. В кн.: *Albert Einstein – Philoso-Philosopher-Scientist* / ed. by P. A. Schilpp, Evanston (Illinois), 1945, 1–95.
15. **Bell J. S.** Bertlmann's socks and the nature of reality // *Journal de Physique*. 1981. V. 42. P. 41–61; P. 139 in [12].
16. **Эйнштейн А.** Замечание о квантовой теории // *Собрание научных трудов*. Т. 3. – М.: Наука, 1966. С. 528–530; *Electrons et photons. Rapports et discussions du cinquieme Conseil de physique-Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927 sous les auspices de l' Institut International de physique Solvay*, p. 253–256. Paris, Gautier-Villars et Cie, editeurs 1928.
17. **Дирак П. А. М.** Принципы квантовой механики. – М.: Наука, 1979.
18. **Нейман И.** Математические основы квантовой механики. – М.: Наука, 1964; von Neumann J., *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1955; *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Springer, Berlin, 1932.
19. **Гейзенберг В.** Физика и философия. – М.: Наука, 1989; Heisenberg W. *Physics and Philosophy*. George Allen and Unwin Edition, 1959.
20. **Шредингер Э.** Наука и гуманизм. Физика в наше время. изд. НИЦ РХД. – Ижевск, 2001.
21. **Tomomura A., Endo J., Matsuda T., Kawasaki T. and Exawa H.** Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern // *Amer. J. Phys.* 1989. V. 57, P. 117–120.
22. **Mermin N.D.** Hidden variables and the two theorems of John Bell // *Rev. Mod. Phys.* 1993. V. 65. P. 803–815.
23. **Hermann G.** *Die Naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik* // *Die Naturwissenschaften*, 1935. V. 42. P. 718–721.
24. **Bell J.S.** On the problem of hidden variables in quantum mechanics // *Rev. Mod. Phys.* 1966. V. 38. P. 447–452.
25. **Бор Н.** Дискуссии с Эйнштейном по проблемам теории познания атомной физике // *Избранные научные труды*. Т. 2. – М.: Наука, 1971. С. 399–433. Bohr N. *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics; Albert Einstein philosopher – scientist*. Ed. by P. A. Schilpp. The library of the living philosophers. V. 7. Evanston, Illinois, 1949, 201–241.
26. **Gerlach W. and Stern O.** Das magnetische Moment des Silberatoms // *Zs. Phys.* 1922. V. 9. P. 353–355.
27. **Ландау Л.Д., Лифшица Е.М.** Квантовая механика. Нерелятивистская теория. – М.: Наука, 1989.
28. **Bohr N.** The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory // *Nature*. 1928. V. 121. P. 580–590.
29. **Aspect A.** Closing the Door on Einstein and Bohr's Quantum Debate // *Physics* 2015. V. 8. P. 123.

30. **Hensen B., et al.** Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres // *Nature* 2015. V. 526. P. 682-686.
31. **Giustina M., et al.** Significant-Loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115. P. 250401.
32. **Shalm L.K., et al.** Strong Loophole-Free Test of Local Realism // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115. P. 250401.
33. **Everett H.** 'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics // *Rev. Mod. Phys.* 1957. V. 29. P. 454-462.
34. **Leggett A.J. and Garg A.** Quantum mechanics versus macroscopic realism: Is the flux there when nobody looks? // *Phys. Rev. Lett.* 1985. V. 54. P. 857-860.
35. **Mooij J.E., Orlando T.P., Levitov L., Tian L., van der Wal C.H., Lloyd S.** Josephson Persistent-Current Qubit // *Science* 1999. V. 285. P. 1036-1039.
36. **Chiorescu I., Nakamura Y., Harmans C.J.P.M., Mooij J.E.** Coherent Quantum Dynamics of a Superconducting Flux Qubit // *Science* 2003. V. 299. P. 1869-1871.
37. **Wendin G.** Quantum information processing with superconducting circuits: a review // *Rep. Prog. Phys.* 2017. V. 80. P. 106001.
38. **Leggett A.J.** Superconducting Qubits – a Major Roadblock Dissolved? // *Science*, 2002. V. 296. P. 861-862.
39. **Clarke J. and Wilhelm F.K.** Superconducting quantum bits // *Nature* 2008. V. 453. P. 1031-1042.
40. **Mooij J.E.** Quantum mechanics: No moon there // *Nature Phys.* 2010. V. 6. P. 401-402.
41. **Palacios-Laloy A., Mallet F., Nguyen F., Bertet P., Vion D., Esteve D., and Korotkov A.N.** Experimental violation of a Bell's inequality in time with weak measurement // *Nature Phys.* 2010. V. 6. P. 442-447.
42. **Knee G.C., Kakuyanagi K., Yeh M.C., Matsuzaki Y., Toida H., Yamaguchi H., Saito S., Leggett A.J., Munro W.J.** A strict experimental test of macroscopic realism in a superconducting flux qubit // *Nature Comm.* 2016. V. 7. P. 13253
43. **Tanaka H., Sekine Y., Saito S., Takayanagi H.** DC-SQUID readout for qubit // *Physica C* 2002. V. 368. P. 300-304.
44. **Nikulov A.V.** Flux-qubit and the law of angular momentum conservation // *Quantum Computers and Computing*, 2010. V. 10. P. 42-61.
45. **Nikulov A.V.** Superposition of flux-qubit states and the law of angular momentum conservation // *Physical Properties of Nanosystems*. Eds. Janez Bonca and Sergei Kruchinin, p.269-280, NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics, Springer 2011.
46. **Gurtovoi V.L. and Nikulov A.V.** Energy of magnetic moment of superconducting current in magnetic field // *Physica C*, 2015. V. 516. P. 50-54.
47. **van Kampen N.G.** Ten theorems about quantum mechanical measurements // *Physica A* 1988 V. 153 P. 97-113.
48. **Bell J.S.** Against Measurement // *Phys. World* 1990. V. 3. P. 33-40.
49. **Эйнштейн А.** Замечания к статьям // *Собрание научных трудов*. Т. 4. – М.: Наука, 1967. С. 294-315
50. **Conway J. and Kochen S.** The Free Will Theorem // *Found. Phys.* 2006. V. 36. P. 1441-1473 (2006); arxiv: quant-ph/0604079.
51. **т Хоофт Г.** О постулате свободы воли в квантовой механике // *Вестник РАН*. 2011. V. 81. P. 907-912.
52. **Hess K.** Einstein was right! Pan Stanford Publishing Pte. Ltd. 2015.
53. **Эйнштейн А.** Вводные замечания об основных понятиях // *Собрание научных трудов*. Т. 3. – М.: Наука, 1966. С. 623-626 (624); *Einleitende Bemerkungen uber Grundbegriffe* // В сб. Louis de Broglie, physicien et penseur. – Paris, 1953. P. 4-14.
54. **Handsteiner J., et al.** Cosmic Bell Test: Measurement Settings from Milky Way Stars // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 118. P. 060401.
55. **Rosenfeld W., Burchardt D., Garthoff R., Redeker K., Ortegel N., Rau M., and Weinfurter H.** Event-Ready Bell Test Using Entangled Atoms Simultaneously Closing Detection and Locality Loopholes // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 119. P. 010402.
56. **Saunders D.J., Bennet A.J., Branciard C., Pryde G.J.** Experimental demonstration of nonbilocal quantum correlations // *Sci. Adv.* 2017. V. 3. e1602743.
57. **De Raedt H., Michielsen K., Hess K.** The photon identification loophole in EPRB experiments: computer models with single-wing selection // *Open Physics* 2017. V. 15. P. 713-733.
58. **Schrodinger E.** An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms // *Phys. Rev.* 1926. V. 28. P. 1049-1070.

59. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. Т. 9. Квантовая механика. – М.: Мир, 1967; Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M. The Feynman Lectures on Physics, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1963.
60. **Ballentine L.E.** Realism and quantum flux tunneling // Phys. Rev. Lett. 1987, V. 59. P. 1493–1495.
61. **Nikulov A.V.** Could ordinary quantum mechanics be just fine for all practical purposes? // Quantum Studies: Mathematics and Foundations. 2016. V. 3. P. 41–55.
62. **Einstein A.** (1928) letter to E. Schrodinger, 31 May 1928, reprinted in Letters on Wave Mechanics, ed. M. Klein, New York: Philosophical Library, 1967.
63. **Гринштейн Дж., Зайонц А.** Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики / 2-е изд.; пер. с англ. под ред. и с доп. В. В. Аристова и А. В. Никулова. – Долгопрудный: ИД «ИНТЕЛЛЕКТ», 2012.
64. **Ортега-и-Гассет Х.** Восстание масс. – М: АСТ: Ермак, 2005.
65. **Aristov V.V. and Nikulov A.V.** The fundamental obscurity in quantum mechanics. Why it is needed to shout «wake up» // Proceedings of 19th International Symposium «NANOSTRUCTURES: Physics and Technology», Russia, St. Petersburg, Ioffe Physical-Technical Institute 2011, p. 145–146.
66. **Aristov V.V. and Nikulov A.V.** Could the Schrodinger's Cat be used as Quantum Bit? // Proceedings of the International Conference «Micro- and nanoelectronics – 2009», extended Session «Quantum Informatics», October 5–9, 2009, «Lipki», Zvenigorod, Moscow region, Russia, p. Q2–02.

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРОБОЯ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

В данной статье рассматриваются модели пробоя подзатворного диэлектрика. Рассмотрены такие модели, как термохимическая модель, модель инжекции дырок из анода, модель выхода водорода и комплементарная модель. А также описаны условия их применимости.

Ключевые слова: пробой диэлектрика, диоксид кремния, термохимическая модель, модель выхода водорода, комплементарная модель

Сведения об авторах:

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

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

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

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

3D ДВУХЗАТВОРНЫЙ БЕСПЕРЕХОДНОЙ МОП-ТРАНЗИСТОР

С целью улучшения параметров планарного беспереходного МОП-транзистора проведено моделирование трехмерного двухзатворного варианта прибора с применением пакета Sentaurus TCAD. Показано, что 3D беспереходной МОП-транзистор при технологических нормах 90 нм имеет подпороговый ток – $3 \cdot 10^{-13}$ А/мкм и подпороговый наклон – 82 мВ/дек, что превосходит параметры традиционных МОП-транзисторов при сопоставимой величине тока насыщения 320 мкА/мкм.

Ключевые слова: беспереходной транзистор, моделирование, tcad

Сведения об авторах:

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

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

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

ANALYSIS OF GATE OXIDE BREAKDOWN MODELS

In this article models of gate oxide breakdown are considered. Such models as hydrogen release model, thermochemical model, anode hole injection model and complementary model are considered. Conditions for the applicability are also described.

Keywords: oxide breakdown, silicon dioxide, thermochemical model, hydrogen release model, complementary model

Data of authors:

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

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

Ignatov Pavel Viktorovich, "Molecular Electronic Research Institute", Stock Company, d. 12/1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: paignatov@niime.ru;

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

3D DOUBLE-GATE JUNCTIONLESS MOSFET

Double-gate junctionless transistors were analyzed using Sentaurus TCAD simulation package. It was shown that 3D double-gate junctionless MOSFET with 90 nm design rules has very low leakage current – $3 \cdot 10^{-13}$ A/um and subthreshold slope – 82 mV/dec with saturation current at about 320 uA/um. Such characteristics of simulated junctionless transistor are better than conventional inversion-mode transistor parameters.

Keywords: junctionless transistor, simulation, tcad

Data of authors:

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

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

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

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

Чаплыгин Юрий Александрович, академик Российской академии наук, президент Научно-исследовательского университета «Московский институт электронной техники», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»; 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: ieeet@miiee.ru.

ОБЗОР МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ В ГЛУБОКОСУБМИКРОННОМ МОП-ТРАНЗИСТОРЕ

В данной статье рассматриваются конструктивно-технологические методы подавления короткоканальных эффектов в глубокосубмикронном МОП-транзисторе. Анализируются преимущества и недостатки различных конструкций.

Ключевые слова: МОП-транзистор, короткоканальные эффекты, кремний на изоляторе, подпороговый размах, ток утечки

Сведения об авторах:

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

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

Игнатов Павел Викторович, «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.12, стр.1, e-mail: paignatov@milron.ru;

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

ТЕХНОЛОГИЯ МЕМРИСТОРОВ

Исследования направлены на создание перспективных элементов энергонезависимой высокоскоростной радиационно-стойкой резистивной памяти сверхбольшого объема, основанной на новых физических принципах функционирования. Изучены оптические параметры активной среды мемристоров с использованием метода SPR. Вероятно, что механизмы переключения мемристоров основаны на теории филаментов, дополненной физикой аморфных широкозонных полупроводников. Этот подход позволит усовершенствовать технологию создания элементной базы для нейроморфных систем.

Ключевые слова: технология, мемристор, оптика, SPR, полупроводник

Сведения об авторах:

Палагушкин Александр Николаевич, Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», 117218, Москва, Нахимовский пр-т 36, корп.1, e-mail: iontras@yandex.ru;

Юдкин Федор Анатольевич, Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», 117218, Москва, Нахимовский пр-т 36, корп.1, e-mail: iontras@yandex.ru;

A REVIEW OF METHODS FOR SUPPRESSION OF SHORT-CHANNEL EFFECTS IN DEEP SUBMICRON MOS TRANSISTOR

In this article constructive-technological methods for suppression of short-channel effects in deep submicron MOS transistor are considered. Advantages and disadvantages of different constructions are analyzed.

Keywords: MOS transistor, short-channel effects, silicon on insulator, subthreshold slope, leakage current

Data of authors:

Krasnikov Gennady Yakovlevich, doctor of Engineering Sciences, academician of Russian Academy of Sciences, Full Professor, «Molecular Electronics Research Institute» Stock Company, 12/1, 1-y Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: gkrasnikov@niime.ru;

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

Ignatov Pavel Viktorovich, «Molecular Electronics Research Institute» Stock Company, 12/1, 1-y Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: paignatov@milron.ru;

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

TECHNOLOGY OF MEMRISTORS

Current investigations are aimed to creation of innovation elements for radiation-resistant nonvolatile fast storage of very large volume, based on new physical functionality principles. Optical parameters of memristor active medium were investigated using SPR method. The memristors switching mechanisms were explained using filaments theory, extended by physics of amorphous wideband semiconductors. This can improve the technology of elements for neuromorphic systems.

Keywords: technology, memristor, optics, semiconductor

Data of authors:

Palagushkin Aleksandr Nikolaevich, Federal State Institution «Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences», d. 36, korp. 1, pr-t Nakhimovsky, Moscow, Russian Federation, 117218, e-mail: iontras@yandex.ru;

Yudkin Fedor Anatolyevich, Federal State Institution «Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences», d. 36, korp. 1, pr-t Nakhimovsky, Moscow, Russian Federation, 117218, e-mail: iontras@yandex.ru;

Prokopenko Sergey Alekseevich, Federal State Institution «Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences», d. 36, korp. 1, pr-t Nakhimovsky, Moscow, Russian Federation, 117218, e-mail: iontras@yandex.ru;

Прокопенко Сергей Алексеевич, Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», 117218, Москва, Нахимовский пр-т 36, корп.1, e-mail: iontras@yandex.ru;

Сергеев Александр Петрович, Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», 117218, Москва, Нахимовский пр-т 36, корп.1, e-mail: iontras@yandex.ru

ПЛАТИНОВЫЕ СТАД-БАМПЫ С ПРИПОЙНЫМИ ШАРИКАМИ НА АЛЮМИНОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КРЕМНИЕВЫХ КРИСТАЛЛОВ В ТЕХНОЛОГИИ FLIP-CHIP

Рассмотрены технологические особенности формирования платиновых стад-бампов термозвуковой микросваркой на кремниевых кристаллах с алюминиевой металлизацией контактных площадок. Проанализирована схема процесса нанесения припойных шариков на платиновые стад-бампы для сборки интегральных схем (далее – ИС) по технологии flip-chip.

Ключевые слова: алюминиевая металлизация, платиновая проволока, термозвуковая сварка, стад-бамп, припойный шарик

Сведения об авторах:

Побединский Виталий Владимирович, Воронежский государственный университет; Научно-исследовательский институт электронной техники, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 5, Российская Федерация, 394033; e-mail: vityal.pobedinsky@yandex.ru;

Рогозин Никита Владимирович, Научно-исследовательский институт электронной техники, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 5, Российская Федерация, 394033, e-mail: niktrace@mail.ru;

Лаврентьев Евгений Вячеславович, Научно-исследовательский институт электронной техники, ул. Старых Большевиков, д. 5, г. Воронеж, Российская Федерация, 394033, e-mail: lavrentjev.e.v@yandex.ru;

Рябов Александр Валерьевич, Научно-исследовательский институт электронной техники, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 5, Российская Федерация, 394033, e-mail: a.v.ryabov88@gmail.com;

Зенин Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор, Научно-исследовательский институт электронной техники, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 5, Российская Федерация, 394033, e-mail: zenvik@bk.ru;

Бормонтов Евгений Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Университетская пл., д. 1, Российская Федерация, 394018, e-mail: me144@phys.vsu.ru.

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА ОСВЕЩЕНИЯ В ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

С уменьшением минимальных размеров элементов интегральных схем растут возможности литографического оборудования, и для реализации передовых технологических уровней сегодня используются установки проекционной фото-литографии с возможностью произвольного конфигурирования источника освещения. Появление данного функционала в установках привело к возникновению задачи оптимизации геометрии источника освещения, решаемой в данной работе. В статье рассмотрены методы представления источника освещения в задачах оптимизации, приведен обзор алгоритмов решения, а также

Sergeev Alexandr Petrovich, Fed-eral State Institution «Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences», d. 36, korp. 1, pr-t Nakhimovsky, Moscow, Russian Federation, 117218, e-mail: iontras@yandex.ru

PLATINUM STUD-BUMPS WITH SOLDER BALLS ON ALUMINUM METALLIZATION OF SILICON DIE IN FLIP-CHIP TECHNOLOGY

Technological features of platinum stud-bumps formation by thermosonic welding on silicon die with aluminum metallization of contact pads were considered. The scheme of process to mount solder balls on platinum stud-bumps for the manufacturing of semiconductor devices by the flip-chip technology was analyzed.

Keywords: aluminum metallization, platinum wire, thermosonic welding, stud-bump, solder ball

Data of authors:

Pobedinsky Vitaly Vladimirovich, Voronezh State University, Scientific Research Institute of Electronic Technology, 5, Starykh Bol'shevikov, Voronezh, Russian Federation, 394033, e-mail: vityal.pobedinsky@yandex.ru;

Rogozin Nikita Vladimirovich, Scientific Research Institute of Electronic Technology, 5, Starykh Bol'shevikov, Voronezh, Russian Federation, 394033, e-mail: niktrace@mail.ru;

Lavrentev Evgeny Vyacheslavovich, Scientific Research Institute of Electronic Technology, 5, Starykh Bol'shevikov, Voronezh, Russian Federation, 394033, e-mail: lavrentjev.e.v@yandex.ru;

Ryabov Alexandr Valerievich, Scientific Research Institute of Electronic Technology, 5, Starykh Bol'shevikov, Voronezh, Russian Federation, 394033, e-mail: a.v.ryabov88@gmail.com;

Zenin Victor Vasilievich, doctor of Engineering sciences, Professor, Scientific Research Institute of Electronic Technology, 5, Starykh Bol'shevikov, Voronezh, Russian Federation, 394033, e-mail: zenvik@bk.ru;

Bormontov Evgeny Nikolaevich, Doctor of Physico-mathematical Sciences, Professor, Voronezh State University, 1, Universitetskaya pl., Voronezh, Russian Federation, 394018, e-mail: me144@phys.vsu.ru.

ILLUMINATION SOURCE OPTIMIZATION METHOD IN PROJECTION PHOTO-LITHOGRAPHY

The smaller minimal integrated circuit feature size becomes the more capabilities lithography equipment acquires. So for cutting edge technologies lithography tools with free form illumination sources are used. The function has led to optimization task origin for illumination geometry and the task is the subject of the work. Illumination source mathematical representation and optimization algorithms reviews are given in the article. Besides genetic algorithm usage for source geometry optimization is demonstrated.

Keywords: photolithography, resolution, illumination source optimization

продемонстрирована оптимизация освещения с использованием генетического алгоритма.

Ключевые слова: фотолитография, разрешающая способность, источник освещения, оптимизация, генетический алгоритм

Сведения об авторах:

Харченко Екатерина Леонидовна, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д.1; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: ekharchenko@mikron.ru;

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

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

ПОЛЕВАЯ ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ МНОГООСТРИЙНЫХ КРЕМНИЕВЫХ КАТОДНЫХ МАТРИЦ

Исследовано влияние плазмохимической модификации поверхности на автоэмиссионные свойства кристаллов кремния дырочного типа проводимости. Показано, что применение фторуглеродной плазмы при структурировании поверхности кристаллов кремния с использованием углеродного масочного покрытия позволяет получать заданные токи автоэмиссии при различных напряженностях внешних электрических полей независимо от коэффициентов усиления поля эмиссионных выступов. Рассмотрены физико-химические механизмы, ответственные за модификацию автоэмиссионных характеристик кристаллов кремния.

Ключевые слова: полевая эмиссия электронов, морфология, кремний, модификация поверхности

Сведения об авторах:

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

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

Орлов Сергей Николаевич

Яфаров Равиль Кяшшафович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской Академии Наук, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38, e-mail: pirpc@yandex.ru;

Яфаров Андрей Равильевич, ведущий инженер лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской Академии Наук, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38, e-mail: andryf@yandex.ru;

Data of authors:

Kharchenko Ekaterina Leonidovna, «National Research University of Electronic Technology», Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498; «Molecular Electronic Research Institute» Stock Company, National Research University of Electronic Technology, d. 12/1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: ekharchenko@mikron.ru;

Ivanov Vladimir Viktorovich, «Molecular Electronic Research Institute» Stock Company, National Research University of Electronic Technology, d. 12/1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: vlaivanov@mikron.ru;

Kuzovkov Aleksey Valerievich, «Molecular Electronic Research Institute» Stock Company, National Research University of Electronic Technology, d. 12/1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: akuzovkov@mikron.ru

FIELD EMISSION OF ELECTRONS OF MULTI-TIP CATHODE MATRICES ON P-TYPE SILICON CRYSTALS

The influence of the plasma-chemical modification of the surface on the autoemission properties of the p-type silicon crystals of silicon is investigated. It is shown that the use of fluorocarbon plasmas during the structuring of the surface of silicon crystals using a carbon mask coating allows one to obtain given autoemission currents at various intensities of external electric fields, regardless of the amplification factors of the field of emission protrusions. The physicochemical mechanisms responsible for the modification of field emission characteristics of silicon crystals are considered.

Keywords: field emission of electrons, morphology, silicon, modification of a surface

Data of authors:

Krasnikov Gennady Yakovlevich, doctor of Engineering Sciences, academician of Russian Academy of Sciences, Full Professor, «Molecular Electronics Research Institute» Stock Company, 12/1, 1-y Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: gkrasnikov@niime.ru;

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

Orlov Sergey Nikolaevich

Yafarov Ravil Kyashshafovich, doctor of Engineering Sciences, Head of laboratory of Submicron electron ion technology, Saratov branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya St., Saratov, 410019, Russia, e-mail: pirpc@yandex.ru;

Yafarov Andrey Ravilevich, Principal engineer of laboratory of Submicron electron ion technology, Saratov branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38, Zelenaya St., Saratov, 410019, Russia, e-mail: andryf@yandex.ru;

Timoshenkov Sergey Petrovich, doctor of Engineering Sciences, professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), etc. 1, pl. Shokina, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia, e-mail: spt@miee.ru;

Тимошенко Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: spt@miee.ru;

Тимошенко Валерий Петрович, доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: ieem@miee.ru.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОМЕХАНИКИ И АКУСТОЭЛЕКТРОНИКИ

Приведены результаты моделирования конструкции чувствительного элемента микроакселерометра в части размеров инерционной массы и гибкого подвеса с ПАВ-топологией. Расчетно-аналитическим методом и методом математического моделирования в среде COMSOL Multiphysics определены оптимальные размеры и форма элементов конструкции для заданной номинальной нагрузки в 5g. Показано, что добиться равномерного изгиба подвеса можно, используя конструкцию переменной ширины/толщины.

Ключевые слова: МЭМС, ПАВ, моделирование, COMSOL Multiphysics, микроакселерометр

Сведения об авторах:

Бакулин Евгений Михайлович, Открытое акционерное общество «Авангард», 195271, Россия, Санкт-Петербург, Кондратьевский проспект, 72А, e-mail: bakulin.evg@gmail.com;

Курушин Григорий Валерьевич, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, e-mail: violonistahiles8@gmail.com;

Строганов Кирилл Александрович, Открытое акционерное общество «Авангард», 195271, Россия, Санкт-Петербург, Кондратьевский проспект, 72А, e-mail: stroganoff2000@mail.ru.

СПОСОБ ОЦЕНКИ ЛАТЕНТНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ РЕГИСТРАЦИИ БИОПОТЕНЦИАЛОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА

В работе рассматривается структурная схема передачи данных между устройством для регистрации биологических сигналов и электронно-вычислительной машиной. Описывается способ оценки временного интервала между моментами возникновения потенциала на входе регистрирующей системы и получения оцифрованных данных прикладной программой. Представлены результаты оценки латентности передачи данных с использованием протокола Lab Streaming Layer для усилителей биопотенциалов NVX52 и NVX136.

Ключевые слова: усилитель, латентность, ээг, lsl, nvx

Сведения об авторах:

Забодаев Станислав Викторович, Общество с ограниченной ответственностью «Медицинские компьютерные системы» Москва, Зеленоград г., 4922-й пр-д, 4с2, e-mail: szabodaev@mail.ru;

Селищев Сергей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Московский Институт Электронной Техники», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, e-mail: sersel@miee.ru.

Timoshenkov Valery Petrovich, doctor of Engineering Sciences, associate Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), etc. 1, pl. Shokina, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia, e-mail: ieem@miee.ru.

RESULTS OF SIMULATION OF THE MICROACCELEROMETER DESIGN BASED ON INTEGRATED TECHNOLOGY OF MICROMECHANICS AND ACOUSTOELECTRONICS

The results of simulation of design of microaccelerometer in terms of the dimensions of the inertial mass and flexible balk with a SAW topology are presented. Calculation-analytical method and mathematical modeling method in the COMSOL Multiphysics environment determined the optimal sizes and shape of the structural elements of the sensor for a specified nominal load of 5g. It is shown that it is possible to achieve uniform bending of the balk using a variable width / thickness construction.

Keywords: MEMS, SAW, modeling, COMSOL Multiphysics, microaccelerometer

Data of authors:

Bakulin Evgeniy Mikhailovich, Joint-stock company «Avangard», 72A, Kondratievsky ave, St. Petersburg, Russian Federation, 195271, e-mail: bakulin.evg@gmail.com;

Kurushin Grigoriy Valerievich, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», ul. Professora Popova 5, 197376, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: violonistahiles8@gmail.com

Stroganov Kirill Aleksandrovich, Joint-stock company «Avangard», 72A, Kondratievsky ave, 195271, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: stroganoff2000@mail.ru.

METHOD OF EVALUATION OF DATA STREAM LATENCY IN BRAIN BIOPOTENTIALS ACQUISITION SYSTEMS

This paper describes structural scheme of data transfer between device for acquisition of biological signals and computer. Method for estimating of time interval between the moment of occurrence of potential at the input of an acquisition system and the moment of receiving of digitized data by applied software is described. Results of evaluation of the data stream latency using Lab Streaming Layer protocol for the amplifiers of biopotentials NVX52 and NVX136 are presented.

Keywords: amplifier, latency, eeg, lsl, nvx

Data of authors:

Zabodaev Stanislav Viktorovich, Medical Computer Systems Ltd., building 4-2, passage 4922, Zelenograd, Moscow, 124460 Russia, e-mail: szabodaev@mail.ru;

Selishchev Sergey Vasilievich, National Research University of Electronic Technology (MIET), etc.1, pl. Shokina, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia, e-mail: sersel@miee.ru.

О ПРИЧИНАХ СОМНЕНИЙ В РЕАЛЬНОСТИ КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА

Рассматриваются причины сомнений в реальности квантового компьютера, такие как противоречие идеи квантовых вычислений с реализмом, сомнения в возможности мистического действия на расстоянии и существовании множества параллельных вселенных. Идея квантовых вычислений появилась вследствие непонимания смысла спора между критиками (Эйнштейн и др.) и защитниками (Бор и др.) квантовой механики. Появление квантовой информатики свидетельствует, скорее, о кризисе физики, чем о технологическом прорыве.

Ключевые слова: квантовый компьютер, ЭПР корреляция, мистическое действие на расстоянии, неравенства Белла, противоречие с реализмом

Сведения об авторах:

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

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

THE REASONS FOR DOUBTS ABOUT THE REALITY OF QUANTUM COMPUTER

The causes of doubts about the reality of quantum computer, such as the contradiction of quantum mechanics with realism, doubts about the possibility of 'spooky action at a distant' and the existence of many parallel universes, are considered. The idea of quantum computing appeared as a result of misunderstanding of the dispute between critics (Einstein et al.) and defenders (Bohr et al.) of quantum mechanics. The appearance of quantum information science reveals the crisis of physics rather than the technological breakthrough.

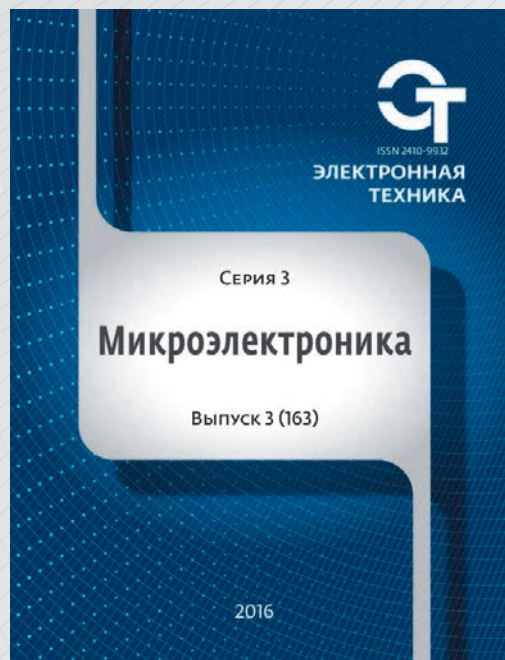
Keywords: quantum computer, EPR correlation, spooky action at a distance, Bell's inequalities, contradiction with realism

Data of authors:

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

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

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ "ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. СЕРИЯ 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА" НА 2018 ГОД!



На страницах издания публикуются статьи, посвященные оригинальным научно-техническим разработкам в области технологий и оборудования для микро- и нанoeлектроники.

Журнал **индексируется** в реферативной системе Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) elibrary.ru, входит в **ядро РИНЦ** и в базу данных **RSCI** на платформе Web of Science, включен **Высшей аттестационной комиссией** России в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

Для удобства читателей и подписчиков мы постарались учесть несколько способов подписки, среди которых можно выбрать наиболее удобный для вас.

Оформить подписку на печатные версии журналов через Почту России и альтернативные агентства: **подписной индекс 80408 в каталоге ОАО Агентство «Роспечать»**. Оформляется в любом почтовом отделении путем заполнения и оплаты АБОНЕМЕНТА и Доставочной карточки (Форма СП-1) на конкретный срок подписки. Стоимость годовой подписки – 3600 руб.

Оформить подписку или приобрести отдельные выпуски непосредственно в редакции. Для этого **юридическим лицам** достаточно отправить в редакцию гарантийное письмо за подписью руководителя и главного бухгалтера (Приложение 1). Счет-фактура и накладные выставляются только по факту оплаты. 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. **Физическим лицам** необходимо оплатить квитанцию в любом отделении «Сбербанка России» и выслать копию оплаченной квитанции (Приложение 2) на электронный адрес: journal_EEM-3@mikron.ru. Стоимость годовой подписки в редакции – 3200 руб.

Журналы будут направлены по почте на адрес плательщика или на иной адрес по доверенности плательщика.

Редколлегия журнала предлагает всем предприятиям, организациям и компаниям, оформившим подписку на журнал, направлять в наш адрес материалы. Представляющие научный и практический интерес статьи будут опубликованы.

По всем вопросам подписки и приобретения журналов обращайтесь в редакцию

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

Заявка

Просим оформить годовую подписку на 2018г. на журнал «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника» в количестве ___ номеров (___ комплект) на сумму ___ руб. ___ коп.

Оплату гарантируем.

Реквизиты предприятия:

Наименование предприятия,

ИНН, КПП,

р/с №В, г.

к/с №,

БИК, Код ОКПО.....,

код ОКВЭД, ОКТМ.....

Юридический адрес.....

Тел:....., Факс:.....

Руководитель

Бухгалтер

<p>Извещение</p>	<p><u>АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»</u> ФПД-4 (наименование получателя платежа) <u>7735579027/773501001</u> 40702810100410001663 (ИНН / КПП получателя платежа) (номер счета получателя платежа) в <u>Филиал «Центральный» Банка ВТБ в г. Москве</u> БИК 044525411 (наименование банка получателя платежа) <u>30101810145250000411</u> в <u>Филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО), г. Москва</u> (Номер кор./сч. банка получателя платежа) <u>Подписка на журнал «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника»</u> (наименование платежа) Количество экземпляров _____ На 20 г. по кварталам</p> <table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table> <p>Ф.И.О. плательщика _____ Адрес плательщика _____ Сумма платежа _____ руб. _00 коп. Сумма платы за услуги _____ руб. ___ коп. Итого _____ руб. __ коп. «_____» _____ 20__ г. С условиями приема указанной в платёжном документе суммы, в т. ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____</p>	1	2	3	4				
1	2	3	4						
<p>Квитанция</p>	<p><u>АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»</u> ФПД-4 (наименование получателя платежа) <u>7735579027/773501001</u> 40702810100410001663 (ИНН / КПП получателя платежа) (номер счета получателя платежа) в <u>Филиал «Центральный» Банка ВТБ в г. Москве</u> БИК 044525411 (наименование банка получателя платежа) <u>30101810145250000411</u> в <u>Филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО), г. Москва</u> (Номер кор./сч. банка получателя платежа) <u>Подписка на журнал «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника»</u> (наименование платежа) Количество экземпляров _____ На 20 г. по кварталам</p> <table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table> <p>Ф.И.О. плательщика _____ Адрес плательщика _____ Сумма платежа _____ руб. _00 коп. Сумма платы за услуги _____ руб. ___ коп. Итого _____ руб. __ коп. «_____» _____ 20__ г. С условиями приема указанной в платёжном документе суммы, в т. ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен. Подпись плательщика _____</p>	1	2	3	4				
1	2	3	4						

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

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

Журнал издается 4 раза в год с 1965 года.
Подписано в печать 29.06.2018.

Отпечатано в типографии ООО «Красногорский полиграфический комбинат».
Номер заказа Е-3590.
✉ 107140, г. Москва, 1-й Красносельский пер., д. 3, оф. 17.

Тираж 500 экз. Цена договорная.

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

ИЗДАТЕЛЬ

АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»
☎ +7 495 234-01-10 📠 +7 495 956-33-46

✉ journal@electronics.ru

Подготовлено АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»

КОРРЕКТОР: А. Лужкова

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВЕРСТКА: А. Небольсин