

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 3(195) 2024

ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Issue 3(195) 2024

Москва, 2024

«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА.**Серия 3.****МИКРОЭЛЕКТРОНИКА»****Редакционный совет****Главный редактор****Красников Геннадий Яковлевич,**
д. т. н., академик РАН**Члены редакционного совета****Асеев Александр Леонидович,**

д. ф.-м. н., академик РАН

Вакланов М. Р., Dr. Sc.**Бетелин Владимир Борисович,**

д. ф.-м. н., академик РАН

Бокарев Валерий Павлович,

ответственный секретарь, д. т. н.

Бугаев Александр Степанович,

д. ф.-м. н., академик РАН

Быков Виктор Александрович,

д. т. н.

Галиев Галиб Бариевич, д. ф.-м. н.**Горбачев Александр Алексеевич,**

д. ф.-м. н., академик РАН

Горнев Евгений Сергеевич,

зам. главного редактора,

д. т. н., член-корреспондент РАН

Ким Александр Кирилович, к. т. н.**Критенко Михаил Иванович,** к. т. н.**Maev Roman Gr.,** Dr. Sc.**Петричкович Ярослав Ярославович,**

д. т. н.

Рощупкин Дмитрий Валентинович,

д. ф.-м. н., член-корреспондент РАН

Сигов Александр Сергеевич,

д. ф.-м. н., академик РАН

Стемпковский Александр**Леонидович,** д. т. н., академик РАН**Чаплыгин Юрий Александрович,**

д. т. н., академик РАН

Шелепин Николай Алексеевич,

зам. главного редактора, д. т. н.

Эннс Виктор Иванович, д. т. н.**Адрес редакции**✉ Россия, 124460, Москва,
Зеленоград, улица Академика
Валиева, дом 6, стр. 1

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal_EEM-3@mikron.ru

www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

Журнал издается с 1965 года

УчредительАО «Научно-исследовательский
институт молекулярной
электроники»**Слово редактора** 4**Разработка и конструирование****С.П. Скорняков, Л.Г. Антипин, А.В. Глухов, Е.С. Горнев,
С.А. Зенцова, Ю.В. Колковский, К.О. Петросянц, А.С. Сигов,
В.Б. Стешенко, В.Ф. Чицин**Прецизионные радиационно-стойкие дискретные
и интегральные источники опорного напряжения 5**В.П. Драгунов, Д.И. Остертак, Д.М. Казымов,****Е.Ю. Коваленко, М.А. Кузнецов**

Транзисторный делитель напряжения для маломощных МЭМС 16

А.С. Синюкин, М.А. Денисенко, А.С. Исаева, И.Е. ЛысенкоРеализация ведомого устройства последовательного
периферийного интерфейса по технологии базовых матричных
кристаллов 25**Процессы и технология****А.А. Голишников, В.В.Парамонов, И.В. Потапенко,****М.Г. Путря, Н.М. Сомов**Исследование влияния температуры кремниевых пластин
в Bosch-процессе на характеристики формируемых глубоких
структур с малыми аспектными отношениями 34**А.А. Golishnikov, V.V. Paramonov, I.V. Potapenko,****M.G. Putrya, N.M. Somov**Investigation of the influence of silicon wafer temperature
in the Bosch process on the characteristics of deep structures formed
with small aspect ratios 40**А.А. Конарев, Д.А. Варламов**Теоретические аспекты синтеза концентрата тетраметиламмония
гидроксида мембранным электролизом водных растворов
четвертичных аммониевых солей 46**Технологическое и измерительное
оборудование****В.В. Одинокоев, М.Г. Бирюков**Этапы создания отечественного вакуумного технологического
оборудования кластерного типа для микроэлектроники 53**V.V. Odinokov, M.G. Biryukov**Stages of creating domestic cluster-type vacuum technological
equipment for microelectronics 62**В.Ю. Киреев, Д.А. Костюков, В.В. Одинокоев**Системы металлизации интегральных микросхем. Часть 2.
Процессы и оборудование магнетронного распыления
в технологии формирования систем металлизации ИМС 71**Математическое моделирование****С.В. Зыков, С.В. Маличенко**Вероятностный алгоритм взвешенного разделения потока в
программно-конфигурируемых сетях 108**Аннотации** 114Журнал включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК)
в число изданий, рекомендованных для публикации статей
соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук № 2906

**“ELECTRONIC ENGINEERING.
Series 3.
MICROELECTRONICS”**

**Editorial Council
Chief Editor**

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

The Members of Editorial Council

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

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

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

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

Bykov V. A., Sc. D.

Galiev G. B., Sc. D.

Gorbatshevich A. A., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Gornev E. S., Sc. D.,
Corresponding Member
of the RAS, Deputy Chief Editor

Kim A. K., Ph. D.

Kritenko M. I., Ph. D.

Maev Roman Gr., Sc. D.

Petrichkovich Ya. Ya., Sc. D.,

Roshchupkin D.V., Sc. D.

Corresponding Member of the RAS

Sigov A. S., Sc. D.,

Full Member of the RAS

Stempkovskiy A. L., Sc. D.,

Full Member of the RAS

Chaplygin Yu. A., Sc. D.,

Full Member of the RAS

Shelepin N. A., Sc. D.,

Deputy Chief Editor

Enns V. I., Sc. D.

Editorial Staff Address

📍 6/1, Akademika Valieva street,
Zelenograd, Moscow 124460,
Russian Federation

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal_EEM-3@mikron.ru

www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

The journal is published since 1965

Founder

“Molecular Electronics Research
Institute”, Stock Company

Editor’s Column 4

Development and designing

**S.P. Skornyakov, L.G. Antipin, A.V. Glukhov, E.S. Gornev,
S.A. Zentsova, Y.V. Kolkovsky, K.O. Petrosyants, A.S. Sigov,
V.B. Steshenko, V.F. Chishchin**

Precision radiation-resistant discrete and integrated reference voltage
sources 5

**V.P. Dragunov, D.I. Ostertak, D.M. Kazymov, E.Y. Kovalenko,
M.A. Kuznetsov**

Transistor voltage divider for low-power MEMS 16

A.S. Sinyukin, M.A. Denisenko, A.S. Isaeva, I.E. Lysenko

Implementation of a serial peripheral interface slave device using
uncommitted logic array technology 25

Processes and technology

**A.A. Golishnikov, V.V. Paramonov, I.V. Potapenko,
M.G. Putrya, N.M. Somov**

Investigation of the influence of silicon wafer temperature in the
Bosch process on the characteristics of deep structures formed with
small aspect ratios 34, 40

A.A. Konarev, D.A. Varlamov

Theoretical aspects for synthesis of tetramethylammonium hydroxide
concentrate through membrane electrolysis of aqueous solutions
of quaternary ammonium salts 46

Processing and measuring equipment

V.V. Odinokov, M.G. Biryukov

Stages of creating domestic cluster-type vacuum technological
equipment for microelectronics 53, 62

V.Yu. Kireev, D.A. Kostyukov, V.V. Odinokov

Metallization systems of integrated circuits. Part 2. Magnetron
sputtering processes and equipment in the technology of forming
IC metallization systems 71

Mathematical simulation

S.V. Zykov, S.V. Malichenko

Probabilistic algorithm for weighted stream splitting
in software-defined networks 108

Abstracts 114

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 № 2906 by the Higher attestation
Commission (НАС)

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Перед вами очередной 195-й выпуск научно-технического издания «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника».

В данном номере внимание читателей журнала привлекут тематические материалы, опубликованные под рубриками: «Разработка и конструирование», «Процессы и технология», «Технологическое и измерительное оборудование», «Математическое моделирование».

Выпуск журнала представлен восемью оригинальными статьями, посвященными результатам актуальных научных исследований.

Номер открывается разделом «Разработка и конструирование», в одной из публикаций которого представлены результаты разработки, в порядке импортозамещения, серии прецизионных источников опорного напряжения (ИОН) в интегральном исполнении: 1111ЕН013, 1111ЕН014, 1380ЕС025... 1380ЕС095. Во второй статье данного раздела проводятся экспериментальные и теоретические исследования работы бестрансформаторного делителя напряжения с транзисторно-диодной коммутацией, предназначенного для работы в составе маломощных микроэлектромеханических систем и автономных электронных систем с пониженным выходным напряжением. В третьей статье данного блока представлены результаты разработки ведомого устройства SPI по технологии базовых матричных кристаллов (БМК), которые занимают промежуточное положение между полностью заказными и программируемыми логическими интегральными схемами.

В первой публикации следующего раздела «Процессы и технология» исследован Bosch-процесс глубокого анизотропного плазменного травления кремниевых структур с малыми аспектными отношениями. Во второй статье рассмотрен механизм мембранного электролиза водных растворов четвертичных аммониевых солей для выбора направления разработки метода синтеза концентрата ТМАГ.

В первой статье раздела «Технологическое и измерительное оборудование» рассмотрены несколько вариантов вакуумного технологического оборудования кластерного типа и их совершенствования по мере повышения технологических требований



к выходу годных изделий в производстве интегральных схем (ИС) с высокой степенью интеграции и с более сложной топологией. Во второй статье данного раздела выбраны состав и конфигурация производственного кластерного оборудования на базе процессов магнетронного нанесения для формирования систем алюминиевой и медной металлизации ИМС с уровнями технологии (500–45) нм.

В заключительном разделе «Математическое моделирование» предложен обновленный алгоритм взвешенной балансировки с возможностью его задействования для распределения потоков в программно-конфигурируемых сетях (ПКС).

Приглашаем всех заинтересованных читателей к сотрудничеству!

*С уважением,
главный редактор журнала,
академик РАН*

Г.Я. Красников

ПРЕЦИЗИОННЫЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ ДИСКРЕТНЫЕ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Представлены результаты разработки в порядке импортозамещения серии прецизионных источников опорного напряжения (ИОН) в интегральном исполнении: 1111EN013, 1111EN014, 1380EC025...1380EC095. Особенностью разработанных интегральных ИОН является то, что они разработаны в виде гибридных микросхем, содержащих двухкристальный прецизионный термокомпенсированный стабилитрон и чип с соответствующей обвязкой. Особенностью разработанных ИОН является также то, что высокая их радиационная стойкость достигается за счёт высокой радиационной стойкости включённого в их конструкцию прецизионного стабилитрона.

Ключевые слова: интегральные ИОН, гибридные микросхемы, прецизионный стабилитрон.

Сведения об авторах:

Скорняков Станислав Петрович, доктор технических наук, акционерное общество «Новосибирский завод полупроводниковых приборов Восток», 630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60, e-mail: s.skornyakov@nzpp.ru;

Антипин Леонид Григорьевич, акционерное общество «Научно-производственный центр автоматики и приборостроения имени академика Н.А. Пилогина», Россия, 117342, г. Москва, ул. Введенского, д. 1, e-mail: Lga1640@yandex.ru;

Глухов Александр Викторович, кандидат технических наук, акционерное общество «Новосибирский завод полупроводниковых приборов Восток», 630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60, e-mail: a.gluhov@nzpp.ru;

Горнев Евгений Сергеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: egornev@niime.ru;

Зенцова Светлана Александровна, акционерное общество «Новосибирский завод полупроводниковых приборов Восток», 630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60, e-mail: zencova@nzpp.ru;

Колковский Юрий Владимирович, акционерное общество «Научно-производственное предприятие Пульсар», г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Соколиная гора, пр-д Окружной, e-mail: kolk@pulsarmp.ru;

Петросьянц Константин Орестович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая Школа Экономики», 109028, г. Москва, Покровский бульвар, д. 11, e-mail: kpetrosyants@hse.ru;

Сигов Александр Сергеевич, Ак. РАН, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Пр-т Вернадского, д. 78, e-mail: assigov@yandex.ru;

Стешенко Владимир Борисович, кандидат технических наук, профессор, акционерное общество «Российские космические системы», Авиамоторная ул., 53, корп. 1, Москва, e-mail: steshenko_vb@spacecorp.ru;

Чищин Владимир Фёдорович, акционерное общество «Новосибирский завод полупроводниковых приборов Восток», 630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60, e-mail: vfch@nzpp.ru

PRECISION RADIATION-RESISTANT DISCRETE AND INTEGRATED REFERENCE VOLTAGE SOURCES

The results of the development of a series of precision reference voltage sources (RVS) in integrated design in the order of import substitution are presented: 1111EN013, 1111EN014, 1380EC025...1380EC095. A feature of the developed integrated RVS is that they are designed in the form of hybrid chips containing a two-crystal precision zener diode and a chip with an appropriate binding. A feature of the developed RVS is also that their high radiation resistance is achieved due to the high radiation resistance of the precision zener diode included in their design.

Keywords: integrated RVS, hybrid chips, precision zener.

Data of authors:

Stanislav Petrovich Skornyakov, Doctor of Technical Sciences, Joint Stock company "Novosibirsk factory of semiconductor devices east", 630082, Novosibirsk, Dachnaya str., 60, e-mail: s.skornyakov@nzpp.ru;

Leonid Grigorievich Antipin, JSC "Scientific and Production Center of Automation and Instrumentation named after Academician N.A. Pilyugin", 1, Vvedensky str., Moscow, Russia, 117342, e-mail: Lga1640@yandex.ru;

Glukhov Alexander Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Joint Stock company "Novosibirsk factory of semiconductor devices east", 630082, Novosibirsk, Dachnaya str., 60, e-mail: a.gluhov@nzpp.ru;

Evgeniy Sergeevich Gornev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Joint Stock Company "Research Institute of Molecular Electronics", 6/1, st. Academician Valieva, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: egornev@niime.ru;

Zentsova Svetlana Alexandrovna, Joint Stock company "Novosibirsk factory of semiconductor devices east", 630082, Novosibirsk, Dachnaya str., 60, e-mail: zencova@nzpp.ru;

Kolkovsky Yuri Vladimirovich, Joint-stock company "Scientific and Production enterprise Pulsar", Moscow, Okruzhnoy Ave., ext.ter.g. Sokolinaya Gora municipal District, e-mail: kolk@pulsarmp.ru;

Petrosyants Konstantin Orestovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research University "Higher School of Economics", 109028, Moscow, Pokrovsky Boulevard, 11, e-mail: kpetrosyants@hse.ru;

Sigov Alexander Sergeevich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA – Russian Technological University", 78, Vernadsky Ave., Moscow, e-mail: assigov@yandex.ru;

Vladimir Borisovich Steshenko, Candidate of Technical Sciences, Professor, Joint Stock Company "Russian Space Systems", aviamotornaya str., 53, building 1, Moscow, 111250, e-mail: steshenko_vb@spacecorp.ru;

Chishchin Vladimir Fedorovich, "Novosibirsk Semiconductor Devices Plant Vostok", Joint Stock Company, 60 Dachnaya str., Novosibirsk, 630082, e-mail: vfch@nzpp.ru

ТРАНЗИСТОРНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ МАЛОМОЩНЫХ МЭМС

Проведены экспериментальные и теоретические исследования работы бестрансформаторного делителя напряжения с транзисторно-диодной коммутацией, предназначенного для работы в составе малоомощных микроэлектромеханических систем и автономных электронных систем с пониженным выходным напряжением. Показано, что при работе делителя напряжения с транзисторно-диодной коммутацией переключаемых конденсаторов от источника напряжения ограниченной мощности, подключаемого к делителю периодически, КПД может достигать 40%. На основе развиваемых представлений о функционировании делителей получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать характеристики исследованной схемы делителя в широком диапазоне параметров схемы.

Ключевые слова: делитель напряжения, собственная ёмкость диодов, сопротивление нагрузки, переключаемые конденсаторы, аналитические выражения.

Сведения об авторах:

Драгунов Валерий Павлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники, ФГБОУ высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mail: dragunov@corp.nstu.ru;

Остертak Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой полупроводниковых приборов и микроэлектроники, ФГБОУ высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mail: ostertak@corp.nstu.ru;

Казымов Дмитрий Максимович, ФГБОУ высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mail: dimakazymov@rambler.ru;

Коваленко Екатерина Юрьевна, ФГБОУ высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mail: kk3444377@gmail.com;

Кузнецов Максим Андреевич, ФГБОУ высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mail: m.kuznetsov@corp.nstu.ru

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕДОМОГО УСТРОЙСТВА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПЕРИФЕРИЙНОГО ИНТЕРФЕЙСА ПО ТЕХНОЛОГИИ БАЗОВЫХ МАТРИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Интерфейс SPI – один из широко используемых интерфейсов между управляющими и периферийными устройствами, отличающийся простотой, быстротой действия и энергоэффективностью. В статье представлены результаты разработки ведомого устройства SPI по технологии базовых матричных кристаллов (БМК), которые занимают промежуточное положение между полностью заказными и программируемыми логическими интегральными схемами. Испытания изготовленной микросхемы показали согласование с результатами моделирования, помехоустойчивость и возможность работы на частоте до 5 МГц.

Ключевые слова: интерфейс SPI, базовый матричный кристалл, цифровая интегральная микросхема, система автоматизированного проектирования Koucheg, Verilog.

Сведения об авторах:

Синюкин Александр Сергеевич, кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Маллер», Волгоградский пр. 42, к. 5, Москва, 109316, Россия, e-mail: a.sinyukin@gmail.com;

Денисенко Марк Анатольевич, кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Маллер», Волгоградский пр. 42, к. 5, Москва, 109316, Россия, e-mail: dema.bmfe@gmail.com;

Исаева Алина Сергеевна, кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Маллер», Волгоградский пр. 42, к. 5, Москва, 109316, Россия, e-mail: isaevaas@gmail.com;

Лысенко Игорь Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, общество с ограниченной ответственностью «Маллер», Волгоградский пр. 42, к. 5, Москва, 109316, Россия, e-mail: igor.lysenko@mallerllc.ru

TRANSISTOR VOLTAGE DIVIDER FOR LOW-POWER MEMS

The operation of the transformerless voltage divider with transistor-diode switching designed to work as part of low-power microelectromechanical systems and autonomous electronic systems with reduced output voltage is studied both theoretically and experimentally. It is shown that during the operation of the voltage divider with transistor-diode commutation of switchable capacitors from a voltage source of limited power connected to the divider periodically, the efficiency can reach 40%. Based on the developed theory about the divider operation, analytical expressions are obtained enabling to calculate the characteristics of the studied divider circuit in a wide range of circuit parameters.

Keywords: voltage divider, intrinsic capacitance of diodes, load resistance, switchable capacitors, analytical expressions.

Data of authors:

Dragunov Valery Pavlovich, doctor of technical sciences, associate professor, professor of semiconductor devices and microelectronics department, Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, e-mail: dragunov@corp.nstu.ru;

Ostertak Dmitry Ivanovich, candidate of technical sciences, associate professor, Novosibirsk State Technical University (NSTU), 630073, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, e-mail: ostertak@corp.nstu.ru;

Kazymov Dmitry Maksimovich, Novosibirsk State Technical University (NSTU), 630073, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, e-mail: dimakazymov@rambler.ru;

Kovalenko Ekaterina Yurievna, undergraduate student of semiconductor devices and microelectronics department, Novosibirsk State Technical University (NSTU), 630073, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, e-mail: kk3444377@gmail.com;

Kuznetsov Maksim Andreevich, Novosibirsk State Technical University (NSTU), 630073, Novosibirsk, K. Marx Ave., 20, e-mail: m.kuznetsov@corp.nstu.ru

IMPLEMENTATION OF A SERIAL PERIPHERAL INTERFACE SLAVE DEVICE USING UNCOMMITTED LOGIC ARRAY TECHNOLOGY

SPI is one of the commonly used interface between control devices and peripheral devices, which is simple, fast, and energy-efficient. Results of the SPI slave device design based on the uncommitted logic arrays (ULA) technology are presented in the paper. ULA occupy an intermediate position between fully custom integrated circuits and programmable logic integrated circuits. The tests of the fabricated microcircuit showed an agreement with simulation results, noise immunity and possibility to operate with frequency up to 5 MHz.

Keywords: SPI interface, Uncommitted Logic Array, digital integrated circuit, Koucheg computer-aided design system, Verilog.

Data of authors:

Sinyukin Alexander Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, limited liability company "Mapper" (LLC "Mapper"), Volgogradsky pr. 42, building 5, Moscow, 109316, Russia, e-mail: a.sinyukin@gmail.com;

Denisenko Mark Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, limited liability company "Mapper" (LLC "Mapper"), Volgogradsky pr. 42, building 5, Moscow, 109316, Russia, e-mail: dema.bmfe@gmail.com;

Isaeva Alina Sergeyevna, Candidate of Technical Sciences, limited liability company "Mapper" (LLC "Mapper"), Volgogradsky pr. 42, building 5, Moscow, 109316, Russia, e-mail: isaevaas@gmail.com;

Lysenko Igor Evgenyevich, Doctor of Technical Sciences, docent, limited liability company "Mapper" (LLC "Mapper"), Volgogradsky pr. 42, building 5, Moscow, 109316, Russia, e-mail: igor.lysenko@mallerllc.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН В BOSCH-ПРОЦЕССЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОРМИРУЕМЫХ ГЛУБОКИХ СТРУКТУР С МАЛЫМИ АСПЕКТНЫМИ ОТНОШЕНИЯМИ

Исследован Bosch-процесс глубокого анизотропного плазменного травления кремниевых структур с малыми аспектными отношениями. Показано, что основной причиной неравномерности травления, отклонения профиля протравленной структуры от вертикального и проявления эффекта «черного» кремния является перегрев пластины во время процесса ГАПТ кремния. Установлены зависимости скорости травления кремния, угла наклона стенки элементов, подтрав и наличия «черного» кремния от температуры подложки во время Bosch-процесса. Разработан процесс глубокого анизотропного плазменного травления кремниевых структур глубиной порядка 380 мкм в аспектном отношении 1:30, использующий интервальное разбиение циклов травления и позволяющий формировать глубокие и сквозные отверстия для технологий МЭМС и трёхмерной интеграции кристаллов.

Ключевые слова: процесс глубокого анизотропного травления кремния, Bosch-процесс, аспектное отношение, источник индуктивно-связанной плазмы, технология трёхмерной интеграции кристаллов.

Сведения об авторах:

Голишников Александр Анатольевич, кандидат технических наук, Институт интегральной электроники имени академика К.А. Валиева Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, e-mail: golishnikov1960@mail.ru;

Парамонов Владислав Витальевич, Центр коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, e-mail: paramonov@ckp-miet.ru;

Потапенко Илья Викторович, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, НПК «Технологический центр», Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7, e-mail: ilya.potapenko.2015@gmail.com;

Путря Михаил Георгиевич, доктор технических наук, профессор Института интегральной электроники имени академика К.А. Валиева Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, e-mail: mishapmg@gmail.com;

Сомов Никита Михайлович, Институт интегральной электроники имени академика К.А. Валиева Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, НПК «Технологический центр», Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7, e-mail: somovnm@mail.ru

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SILICON WAFER TEMPERATURE IN THE BOSCH PROCESS ON THE CHARACTERISTICS OF DEEP STRUCTURES FORMED WITH SMALL ASPECT RATIOS

Bosch is a process of deep anisotropic plasma etching of silicon structures with small aspect ratios. It is shown that the main reason for the uneven etching, the deviation of the etched structure profile from the vertical and the manifestation of the "black silicon" effect is the overheating of the plate during the silicon DRIE process. The dependences of the silicon etching rate, the angle of inclination of the wall of the elements, the etching and the presence of "black silicon" on the substrate temperature during the Bosch process are established. A process of deep anisotropic plasma etching of silicon structures with a depth of about 380 microns and an aspect ratio of 1:30 has been developed, using interval splitting of etching cycles and allowing the formation of deep and through holes for MEMS technologies and three-dimensional crystal integration.

Keywords: deep anisotropic etching of silicon, Bosch process, aspect ratio, inductively coupled plasma source, technology of three-dimensional crystal integration.

Data of authors:

Alexander Aleksandr Golishnikov, Cand. Sci., Institute of Integrated Electronics named after Academician K.A. Valiev, National Research University of Electronic Technology, Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, e-mail: golishnikov1960@mail.ru;

Vladislav Vitalievich Paramonov, Center for Collective Use "Microsystem Technology and Electronic Component Base", National Research University of Electronic Technology, Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, e-mail: paramonov@ckp-miet.ru;

Ilya Viktorovich Potapenko, National Research University of Electronic Technology, Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, SMC "Technological Center", Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7, e-mail: ilya.potapenko.2015@gmail.com;

Mikhail Georgievich Putrya, Dr. Sci., Prof. of the Institute of Integrated Electronics named after Academician K.A. Valiev, National Research University of Electronic Technology, Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, e-mail: mishapmg@gmail.com;

Nikita Mikhailovich Somov, PhD, Institute of Integrated Electronics named after Academician K.A. Valiev, National Research University of Electronic Technology, Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, Plasma Chemical Processes Section of the Pilot Production, SMC "Technological Center", Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7, e-mail: somovnm@mail.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИНТЕЗА КОНЦЕНТРАТА ТЕТРАМЕТИЛАММОНИЯ ГИДРОКСИДА МЕМБРАННЫМ ЭЛЕКТРОЛИЗОМ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ АММОНИЕВЫХ СОЛЕЙ

В промышленном масштабе концентрат тетраметиламмония гидроксида получают мембранным электролизом водных растворов хлорида тетраметиламмония или бикарбоната тетраметиламмония. Для выбора направления разработки метода синтеза концентрата ТМАГ рассмотрен механизм мембранного электролиза водных растворов этих четвертичных аммониевых солей.

Ключевые слова: мембранный электролиз, тетраметиламмоний гидроксид, безметалльный проявитель.

Сведения об авторах:

*Конарев Александр Андреевич, доктор технических наук,
Научно-исследовательский институт полупродуктов и красителей,
141701, г. Долгопрудный Московской области, Лихачевский проезд, д. 7,
e-mail: konarev.niopik@gmail.com;*

*Варламов Денис Александрович, акционерное общество
«Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»,
124460, г. Москва, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, строение 1,
e-mail: dvarlamov@niime.ru*

ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ВАКУУМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КЛАСТЕРНОГО ТИПА ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Рассмотрены несколько вариантов вакуумного технологического оборудования кластерного типа и их совершенствования по мере повышения технологических требований и выхода годных изделий в производстве интегральных схем (ИС) с высокой степенью интеграции и с более сложной топологией.

Ключевые слова: кластерное оборудование, плазмохимическое травление, удаление фоторезиста, травление поликремния, реактивно-ионное травление.

Сведения об авторах:

*Одинокоев Вадим Васильевич, доктор технических наук, профессор,
АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»,
124460, г. Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10,
e-mail: vodinokov@niitm.ru;*

*Бирюков Михаил Георгиевич, кандидат технических наук,
АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»,
124460, г. Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10,
e-mail: marketing@niitm.ru*

THEORETICAL ASPECTS FOR SYNTHESIS OF TETRAMETHYLAMMONIUM HYDROXIDE CONCENTRATE THROUGH MEMBRANE ELECTROLYSIS OF AQUEOUS SOLUTIONS OF QUATERNARY AMMONIUM SALTS

In the industry the tetramethylammonium hydroxide (TMAH) concentrate is manufactured through a membrane electrolysis of aqueous solutions of tetramethylammonium chloride or tetramethylammonium bicarbonate. The mechanism of the membrane electrolysis of aqueous solutions of these quaternary ammonium salts has been considered to choose the direction of development of the TMAH concentrate synthesis method.

Keywords: membrane electrolysis, tetramethylammonium hydroxide, metal-free developer.

Data of authors:

*Konarev Alexandr Andreevich, Doctor of technical sciences,
Science and Research institute of Organic Intermediates and Dyes, 7, Likhachevsky
proezd, 141701, Moscow region, Dolgoprudny, e-mail: konarev.niopik@gmail.com;
Varlamov Denis Alexandrovich, "Molecular Electronic Research Institute", Stock
Company, Akademika Valieva street, 6/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia,
e-mail: dvarlamov@niime.ru*

STAGES OF CREATING DOMESTIC CLUSTER-TYPE VACUUM TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR MICROELECTRONICS

Several options for cluster-type vacuum technological equipment and their improvement as technological requirements increase and the yield of suitable products in the production of integrated circuits (ICs) with a high degree of integration and a more complex topology are considered.

Keywords: cluster equipment, plasma-chemical etching, photoresist removal, polysilicon etching, reactive ion etching.

Data of authors:

*Odinokov Vadim Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Joint-Stock Company "Research Institute of Precision Machine Manufacturing",
10 Panfilovsky prospect, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia,
e-mail: vodinokov@niitm.ru;*

*Biryukov Mikhail Georgievich, Candidate of Technical Sciences,
Joint-Stock Company "Research Institute of Precision Machine Manufacturing",
10 Panfilovsky prospect, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia,
e-mail: marketing@niitm.ru*

СИСТЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ.**Часть 2. Процессы и оборудование магнетронного распыления в технологии формирования систем металлизации ИМС**

Рассмотрены основные процессы магнетронного нанесения проводящих пленок и конструкции магнетронных распылительных систем для их реализации. Проведена классификация магнетронных распылительных систем. Перечислены требования к процессам осаждения методом магнетронного распыления всех пленок, применяемых в системах металлизации. Сформулированы основные технологические параметры процессов магнетронного нанесения и основные конструктивные параметры систем для их реализации. Определены режимные и конструктивные параметры технологических модулей магнетронного нанесения для реализации требований к системам алюминиевой и медной металлизации ИМС с уровнями технологии 500...45 нм. Приведены модели производственного кластерного оборудования магнетронного нанесения для формирования систем алюминиевой и медной металлизации ИМС с различными уровнями технологии.

Ключевые слова: уровень технологии ИМС, система металлизации, магнетронное распыление, реактивное магнетронное распыление, магнетронная распылительная система, адгезионно барьерная структура, контактное отверстие, аспектное отношение, конформность и равномерность нанесенных пленок, пластина, подложкодержатель.

Сведения об авторах:

Киреев Валерий Юрьевич, акционерное общество «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», доктор технических наук, 124460, г. Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: valerikireev@mail.ru;

Костюков Денис Андреевич, акционерное общество «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», 124460, г. Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: dkostyukov@niitm.ru;

Одинокov Вадим Васильевич, акционерное общество «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», доктор технических наук, 124460, г. Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: vodinokov@niitm.ru

METALLIZATION SYSTEMS OF INTEGRATED CIRCUITS.**Part 2. Magnetron sputtering processes and equipment in the technology of forming ic metallization systems**

Based on the analysis, the composition and configuration of production cluster equipment based on magnetron deposition processes for the formation of aluminum and copper metallization systems of IC with technology levels (500–45) nm were selected. The main processes of magnetron deposition of conductive films and the design of magnetron sputtering systems for their implementation are considered. The classification of magnetron sputtering systems is carried out. The requirements for the deposition processes by magnetron sputtering of all films used in metallization systems are listed. The main technological parameters of magnetron deposition processes and the main design parameters of systems for their implementation are formulated. The operating and design parameters of technological modules of magnetron deposition for the implementation of requirements for aluminum and copper metallization systems of IC with technology levels (500–45) nm have been determined. Models of industrial cluster magnetron deposition equipment for the formation of aluminum and copper metallization systems of IC with different levels of technology are presented.

Keywords: IC technology level, metallization system, magnetron sputtering, reactive magnetron sputtering, magnetron sputtering system, adhesive barrier structure, contact hole, aspect ratio, conformality and uniformity of the deposited films, wafer, substrate holder.

Data of authors:

Kireev Valeriy Yuryevich, Joint-Stock Company "Research Institute of Precision Machine Manufacturing", doctor of technical sciences, 10 Panfilovsky prospect, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: valerikireev@mail.ru;

Kostyukov Denis Andreyevich, Joint-Stock Company "Research Institute of Precision Machine Manufacturing", 10 Panfilovsky prospect, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: dkostyukov@niitm.ru;

Odinokov Vadim Vasilyevich, deputy general, Joint-Stock Company "Research Institute of Precision Machine Manufacturing", doctor of technical sciences, 10 Panfilovsky prospect, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: vodinokov@niitm.ru

ВЕРоятностный алгоритм взвешенного разделения потока в программно-конфигурируемых сетях

Предложен обновлённый алгоритм взвешенной балансировки с возможностью его задействования для распределения потоков в программно-конфигурируемых сетях (ПКС). Целью исследования стала необходимость в адаптации существующих алгоритмов к задачам поиска решений в моделях транспортного равновесия. В разработке использовались методы глубокой аналогии, теории вероятностей, математической статистики. В результате представленный алгоритм может быть использован применительно к задачам моделирования и прогнозирования потоков в сетях ПКС. В качестве теоретического вывода можно отметить состоятельность предложенного подхода к проблемам управления трафиком и ожидаемую воспроизводимость экспериментальных результатов исследования.

Ключевые слова: программно-конфигурируемая сеть, система массового обслуживания, балансировка трафика, взвешенный рандомизированный выбор, взвешенное разделение потока.

Сведения об авторах:

Зыков Сергей Викторович, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», 119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78, e-mail: zikov.mirea@bk.ru;
Маличенко Сергей Владимирович, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», 119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78, e-mail: malichenko.mirea@bk.ru

PROBABILISTIC ALGORITHM FOR WEIGHTED STREAM SPLITTING IN SOFTWARE-DEFINED NETWORKS

An updated algorithm of weighted balancing with the possibility of its use for flow distribution in software-defined networks (SDN) is proposed. The aim of the study was the need to adapt existing algorithms to the problems of finding solutions in transport equilibrium models. The methods of deep analogy, probability theory, and mathematical statistics were used in the development. As a result, the presented algorithm can be used in relation to the problems of modeling and forecasting flows in SDN networks. As a theoretical conclusion, it can be noted the consistency of the proposed approach to traffic management problems and the expected reproducibility of the experimental results of the study.

Keywords: software-defined networks, queueing system, load balancing, weighted random selection, weighted flow splitting.

Data of authors:

Zykov Sergey Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadsky Avenue, Moscow, 119454, e-mail: zikov.mirea@bk.ru;
Malichenko Sergey Vladimirovich, MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadsky Avenue, Moscow, 119454, e-mail: malichenko.mirea@bk.ru.

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

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

Журнал издается 4 раза в год с 1965 года.
Подписано в печать 25.01.2025.

Отпечатано в ФГБУ «Издательство «Наука»
(Типография «Наука»)
121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
Заказ № 1726
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 возвра-
щаются. Срок рассмотрения рукописей – 5 недель.

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБУ «Издательство «Наука»
121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
E-mail: info@naukapublishers.ru
<https://naukapublishers.ru>
<https://naukabooks.ru>