

«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА»

Редакционный совет Главный редактор

Красников Г. Я., академик РАН,
д. т. н.

Члены редакционного совета

Асеев А. Л., академик РАН,
д. ф.-м. н.

Бетелин В. Б., академик РАН,
д. ф.-м. н.

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

Бугаев А. С., академик РАН,
д. ф.-м. н.

Быков В. А., д. т. н.

Галиев Г. Б., д. ф.-м. н.

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

Горнев Е. С., зам. главного редак-
тора, д. т. н.

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

Зайцев Н. А., д. т. н.

Ким А. К., к. т. н.

Критенко М. И., к. т. н.

Петричкович Я. Я., д. т. н.

Сигов А. С., академик РАН,
д. ф.-м. н.

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

Чаплыгин Ю. А., академик РАН,
д. т. н.

Шелепин Н. А., зам. главного
редактора, д. т. н.

Эннс В. И., к. т. н.

Адрес редакции

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

+7 495 229-70-43

journal_EEM-3@mikron.ru

www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

Журнал издается с 1965 года

Учредитель

АО «Научно-исследовательский
институт молекулярной
электроники»

Слово редактора 4

Физические явления

В. В. Аристов

Неоклассическая теория эффекта Комптона и некоторые
следствия изменения его интерпретации 5–20

Разработка и конструирование

В. К. Доля, Е. С. Синютин, С. В. Лебедев

Применение пьезоэлектрического изгибного преобразователя
балочного типа в интеллектуальных датчиках вибрации 21–26

Д. А. Доможаков

Генератор, управляемый напряжением, с токовой компенсацией
влияния технологического процесса и рабочей температуры 27–31

А. В. Кобыляцкий

Библиотеки элементов для проектирования радиационно-
стойких СБИС типа «система-на-кристалле» 32–37

В. И. Анисимкин, Н. В. Воронова, В. А. Осипенко, Н. В. Воронова

Методика измерения потерь распространения поверхностных
акустических волн в слоистых структурах с пленками
переменной толщины 38–43

Процессы и технология

А. К. Костанов

Сравнение характеристик КМОП и CML цифровых схем на
основе КНИ КМОП 0,18-мкм технологии
для рабочих частот до 2 ГГц 44–48

Технологическое и измерительное оборудование

В. М. Долгополов, В. В. Одинокоев, П. А. Иракин, В. М. Варакин,

А. В. Шубников, Н. Г. Мицын

Исследование технологии и разработка оборудования
для глубокого травления кремния на пластинах
диаметром до 200 мм 49–54

Свойства материалов

Н. А. Захаров, В. П. Бокарев, Е. С. Горнев, А. П. Нечипоренко

Влияние углеродных нанотрубок на кристаллизацию и свойства
наноразмерного гидроксипатита кальция 55–60

Математическое моделирование

В. В. Бардушкин, В. Б. Яковлев, А. А. Кочетыгов, Н. И. Петров

Напряженное состояние матричных структур в условиях
воздействия термодинамических факторов 61–66

Аннотации 67–72

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,
Full Member of the RAS, Sc. D.

**The Members
of Editorial Council**

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

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

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

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

Bykov V. A., Sc. D.

Galiev G. B., Sc. D.

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

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

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

Zaitsev N. A., Sc. D.

Kim A. K., Ph.D.

Kritenko M. I., Ph.D.

Petrichkovich Ya. Ya., Sc. D.

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

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

Chaplygin Yu. A.,
Full Member of the RAS, Sc. D.

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

Enns V. I., 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

V. V. Aristov

The Neoclassical Theory of Compton Effect and Some Consequences
of Its Interpretation Changing 5–20

Development and Designing

V. K. Dolya, E. S. Sinyutin, S. V. Lebedev

Application of Piezoelectric Bending Transducer of Beam Type in
Intelligent Vibration Sensors 21–26

D. A. Domozhakov

Voltage Controlled Oscillator With Current Pt Compensation 27–31

A. V. Kobylatskiy

RHBD Libraries for Nanometer System-On-Chip Design 32–37

V. I. Anisimkin, N. V. Voronova, V. A. Osipenko, N. V. Voronova

The Method for Measuring Surface Acoustic Wave Loss in Layered
Structures with Variable Film Profile 38–43

Processes and Technology

A. K. Kostandov

Comparison of Characteristics of CMOS and CML Digital Circuits
Based on SOI CMOS 0.18 Micron Technology for Operating
Frequencies up to 2 Ghz 44–48

Processing and Measuring Equipment

V. M. Dolgopolov, V. V. Odinkov, P. A. Irakin, V. M. Varakin,

A. V. Shubnikov, N. G. Mitsyn

Research and Development of Equipment and Technology for Deep
Silicon Etching on Plates With Diameter of up to 200 mm 49–54

Properties of Materials

N. A. Zakharov, V. P. Bokarev, E. S. Gornev, A. P. Nechiporenko

The Effect of Carbon Nanotubes on Crystallization And Properties of
Nanosized Calcium Hydroxyapatite 55–60

Mathematical Simulation

V. V. Bardushkin, V. B. Yakovlev, A. A. Kochetygov, N. I. Petrov

Stressed State of Matrix Structures in the Conditions of Exposure
to Thermodynamic Factors 61–66

Abstracts 67–72

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

НЕОКЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭФФЕКТА КОМПТОНА И НЕКОТОРЫЕ СЛЕДСТВИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Многочисленные попытки изменения квантовой интерпретации эффекта Комптона до сих пор оказывались неудачными. В настоящей работе показано, что общепринятая фотонная концепция объяснения этого эффекта ошибочна. Обсуждается новая теория, основанная на представлении о рассеянии электромагнитного излучения на электронных волнах де Бройля. Анализируются последствия изменения интерпретации эффекта Комптона на предсказания особенностей динамики релятивистских электронов при их взаимодействии с электромагнитным излучением.

Ключевые слова: эффект Комптона, фотонная концепция, электронные волны де Бройля, релятивистские электроны, электромагнитное излучение

Сведения об авторе:

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.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИЗГИБНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ БАЛОЧНОГО ТИПА В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКАХ ВИБРАЦИИ

В статье рассматривается принцип и устройство пьезоэлектрического изгибного преобразователя балочного типа. Показаны преимущества данного типа конструкции по сравнению с остальными при выборе чувствительного элемента для интеллектуального датчика вибрации. Показана возможность использования преобразователя для самокалибровки датчика. Приведены варианты структурных схем интеллектуального датчика вибрации и проведена оценка схемотехнической сложности аналоговой части для кондиционирования сигнала с данного преобразователя.

Ключевые слова: вибрация, датчик, пьезоэлектрический, analog front-end, чувствительный элемент

Сведения об авторах:

Доля Владимир Константинович, кандидат технических наук, Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор» Инженерно-технологической академии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, д. 10, к. 401; e-mail: dvk@sfnu.ru;

Синютин Евгений Сергеевич, Научно-технический центр «Техноцентр» Инженерно-технологической академии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», 347900, Россия, г. Таганрог, ул. Петровская, д. 81; e-mail: dark_elf@mail.ru;

Лебедев Сергей Валентинович, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498, Зеленоград, ул. Шокина, д. 1, Акционерное общество «Зеленоградский

THE NEOCLASSICAL THEORY OF COMPTON EFFECT AND SOME CONSEQUENCES OF ITS INTERPRETATION CHANGING

Numerous attempts to change quantum interpretation of Compton effect till now was unsuccessful. In the present work it is shown that the standard photon concept for an explanation of this effect is incorrect. The new theory based on representation about scattering of electromagnetic radiation on de Broglie electron waves is discussed. Consequences of Compton effect interpretation changing are analyzed in connection with relativistic electron interaction with electromagnetic radiation.

Keywords: Compton effect, the concept of the photon, de Broglie electron waves, relativistic electrons, electromagnetic radiation

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.

APPLICATION OF PIEZOELECTRIC BENDING TRANSDUCER OF BEAM TYPE IN INTELLIGENT VIBRATION SENSORS

The article deals with the principle and device of piezoelectric bending transducer of beam type. The advantages of this type of construction in comparison with the others are shown when selecting a sensing element for an intelligent vibration sensor. The possibility of using the transducer for self-calibration of the sensor is shown. The variants of the structural schemes of the intelligent vibration sensor and the evaluation of the circuit complexity of the analog part for conditioning the signal from this Converter.

Keywords: vibration, sensor, piezoelectric, analog front-end, sensing element

Data of authors:

Dolya Vladimir Konstantinovich, candidate of engineering Sciences, scientific design and technological department "Pьezopribor" of the South Federal University, 401, 10, st. Milchakova, Rostov-on-Don, 344090, e-mail: dvk@sfnu.ru;

Sinyutin Evgeniy Sergeevich, Scientific and Technical Center "Technocenter", Southern Federal 81, Petrovskaya str., Taganrog, Russia, 347900, e-mail: dark_elf@mail.ru;

Lebedev Sergei Valentinovich, "National Research University "Moscow Institute of Electronic Technology", Shokin, building 1, Zelenograd, 124498; Zelenograd Nanotechnology Center, 6 house, Solnechnaya, Zelenograd, 124527, e-mail: lebedev_sv51@mail.ru.

нанотехнологический центр», 124527, Зеленоград, Солнечная, д. 6,
e-mail: lebedev_sv51@mail.ru.

ГЕНЕРАТОР, УПРАВЛЯЕМЫЙ НАПРЯЖЕНИЕМ, С ТОКОВОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Предложен вариант схемотехнической реализации генератора, управляемого напряжением, с применением техники токовой параметрической стабилизации крутизны вольт-частотной характеристики в зависимости от разброса параметров элементов и рабочей температуры.

Ключевые слова: ГУН, токовое зеркало, кольцевой генератор

Сведения об авторе:

Доможаков Денис Александрович, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Москва, Каширское ш., д. 31, e-mail: dadomozhakov@mephi.ru.

БИБЛИОТЕКИ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ СБИС ТИПА «СИСТЕМА-НА-КРИСТАЛЛЕ»

Рассматриваются вопросы создания радиационно-стойких библиотек цифровых и площадочных элементов для проектирования СБИС типа «система-на-кристалле» (СНК) по базовым отечественным КМОП-технологиям объемного кремния уровня 180 и 90 нм. На основе анализа и оптимизации совокупности правил радиационно-стойкого проектирования и методик оптимизации основных электрических и геометрических параметров СБИС разработаны библиотеки элементов для проектирования СБИС СНК. Библиотеки аттестованы на тестовых кристаллах и в составе СБИС, уровни стойкости к внешним воздействующим факторам соответствуют требованиям, предъявляемым к бортовой электронной компонентной базе (ЭКБ) авиакосмического назначения.

Ключевые слова: радиационно-стойкое проектирование, библиотека элементов, цифровые схемы, система-на-кристалле, радиационная стойкость

Сведения об авторе:

Кобыляцкий Андрей Вадимович, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Москва, Каширское ш., д. 31, e-mail: andreymb@elvees.com.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ С ПЛЕНКАМИ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Разработана методика измерения потерь распространения поверхностных акустических волн в структурах с пленками переменной толщины. Проведена апробация этой методики на структурах со слоями ZnO ступенчатого профиля и подложками монокристаллического кремния, когда слой полностью удален в зазоре между входным и выходным преобразователями. Исследованы два варианта прохождения таких ступенек: в первом – прохождение ступеньки не сопровождается изменением типа акустической волны, во втором – волна меняется с Sezawa на Рэлея и обратно. Измерения показали, что акустические потери в обоих случаях сопоставимы друг с другом и примерно равны потерям, которые испытывают те же волны при распространении в структурах с пленками постоянной толщины на всем пути между преобразователями.

VOLTAGE CONTROLLED OSCILLATOR WITH CURRENT PT COMPENSATION

In this paper, a process stabilization scheme for VCO frequency slope is proposed. The process-dependent current source supplies the oscillator with compensating current.

Keywords: VCO, current mirror, ring oscillator

Data of author:

Domozhakov Denis Aleksandrovich, National Research Nuclear University MEPhI, 31, Kashirskoe sh. Moscow, 115409, Russian Federation, e-mail: dadomozhakov@mephi.ru.

RHBD LIBRARIES FOR NANOMETER SYSTEM-ON-CHIP DESIGN

The issues of radiation-hardened standard cell and IO libraries design for the development of the system-on-chip (SoC) using bulk silicon of 180 nm and 90 nm are considered. The set of radiation-hardened-by-design methods and techniques for optimizing basic electrical and geometric parameters of VLSI are designed. Libraries are certified on test chips and as part of VLSI, the levels of radiation hardness comply with the requirements imposed on the onboard electronics for aerospace purposes.

Keywords: Radiation-Hardening-By-Design, standard cell library, digital circuits, system-on-chip, radiation hardness

Data of author

Kobylyatskiy Andrey Vadimovich, National Research Nuclear University MEPhI, 31, Kashirskoe sh. Moscow, 115409, Russian Federation, e-mail: andreymb@elvees.com.

THE METHOD FOR MEASURING SURFACE ACOUSTIC WAVE LOSS IN LAYERED STRUCTURES WITH VARIABLE FILM PROFILE

Experimental method for measuring surface acoustic wave loss in layered structures with variable film profile is developed. The method is approved using the step-like ZnO films deposited on silicon substrate, when the films are totally removed from the gap between input and output transducers. Two variants of the propagation through the steps are examined: in the first one the wave transmits the steps without type transformation; in the second – the Sezawa-type wave transforms to the Rayleigh-type counterpart and back at the steps. The losses of the waves in both cases are measured to be comparable with each other and with those for the same waves propagating in common structures when films have permanent thickness along the propagation path.

Keywords: surface acoustic wave, propagation loss, substrate, film profile, film step

Ключевые слова: поверхностная акустическая волна, потери распространения, подложка, профиль, ступенька

Сведения об авторах:

Анисимкин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, к. 7, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, e-mail: anis@cplire.ru;

Воронова Нелли Владимировна, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: nvoronova@niime.ru;

Осипенко Виктор Александрович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Элпа», 124460, Москва, Зеленоград, Панфиловский просп., д. 10, e-mail: npklelpa@mail.ru;

Воронова Наталья Владимировна, кандидат физико-математических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Элпа», 124460, Москва, Зеленоград, Панфиловский просп., д. 10, e-mail: vonavl@mail.ru.

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КМОП И CML ЦИФРОВЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ КНИ КМОП 0,18-МКМ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РАБОЧИХ ЧАСТОТ ДО 2 ГГц

В статье представлены результаты проведенного сравнения идентичных КМОП и CML (Current Mode Logic) цифровых схем. Для проведения сравнительного анализа были спроектированы 10-разрядные делители частоты на основе данных типов логик. Сравнивались следующие характеристики схем: занимаемая площадь, ток потребления на различных частотах входного сигнала, максимальная рабочая частота, максимальная амплитуда помехи, генерируемая в результате переключения и передаваемая по шинам питания.

Ключевые слова: CML, схемы смешанного сигнала, малощумящие схемы, делители частоты

Сведения об авторах:

Костандов Арман Константинович, Акционерное общество «Дизайн Центр «СОЮЗ», 124482, г. Москва, г. Зеленоград, корпус 100; e-mail: armankostandov@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГЛУБОКОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ НА ПЛАСТИНАХ ДИАМЕТРОМ ДО 200 ММ

При изготовлении трехмерных структур с применением технологии формирования глубоких отверстий в кремнии (through-silicon vias, TSV), а также при изготовлении микроэлектромеханических систем (МЭМС) широкое распространение получил процесс глубокого анизотропного травления кремния с применением попеременных процессов травления и пассивации (Bosch-процесс). Суть процесса заключается в чередовании стадий реактивно-ионного травления поверхности кремния (как правило, в SF₆) и пассивации поверхности (как правило, с применением C₄F₈) [1, 2]. При этом на стадии травления пассивирующий слой удаляется со дна канавок быстрее, чем со стенок, что в итоге позволяет получить анизотропность процесса травления. К преимуществам процесса можно отнести: проведение процесса при комнатных температурах, высокую селективность к фоторезисту (около 80 : 1 и более), получение структур с аспектным

Data of authors:

Anisimkin Vladimir Ivanovich, doctor of physical and mathematical Sciences, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy Of Sciences, Mokhovaya 11–7, Moscow, 125009, Russia, e-mail: anis@cplire.ru;

Voronova Nelli Vladimirovna, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, d. 12 / 1, 1st Zapadnyy proezd,, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: nvoronova@niime.ru;

Osipenko Victor Alexandrovich, "Scientific research Institute "ELPA", Stock Company, 10, 8c5, Panfilovskiy prospekt, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: npklelpa@mail.ru;

Voronova Natalia Vladimirovna, candidate of physical and mathematical Sciences, "Scientific research Institute "ELPA", Stock Company, 10, 8c5, Panfilovskiy prospekt, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: vonavl@mail.ru.

COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF CMOS AND CML DIGITAL CIRCUITS BASED ON SOI CMOS 0.18 MICRON TECHNOLOGY FOR OPERATING FREQUENCIES UP TO 2 GHz

This paper presents the results of the comparison of identical CMOS and CML (Current Mode Logic) digital circuits. For comparative analysis, 10-bit frequency dividers were designed based on these types of logic. The following circuit characteristics were compared: occupied area, current consumption at various input signal frequencies, maximum operating frequency, maximum interference amplitude generated as a result of switching and transmitted over the power buses.

Keywords: CML, mixed-signal circuits, low-noise circuits, frequency dividers

Data of authors:

Kostandov Arman Konstantinovich, Joint-stock company "Design Center "SOYUZ", 124482, Moscow, Zelenograd, building 100, e-mail: armankostandov@gmail.com

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF EQUIPMENT AND TECHNOLOGY FOR DEEP SILICON ETCHING ON PLATES WITH DIAMETER OF UP TO 200 MM

Process of deep anisotropic silicon etching with alternating steps of etching and passivation ("Bosch" process) is widely used for forming three-dimensional structures with through-silicon vias (TSV), as well as in the manufacturing of micro electromechanical systems (MEMS). The essence of the process lies in alternating steps of reactive-ion etching of silicon (usually SF₆) and passivation of the surface (typically by using C₄F₈) [1, 2]. Herewith the step of etching the passivation layer removing from the bottom of the grooves are faster than from the walls, with the result that allows to obtain anisotropic etching process. Advantages of the process include: carrying out the process at room temperatures, high photoresist selectivity (about 80 : 1 and more), the preparation of structures with an aspect ratio of 30 : 1 [3], the etch rate up to 20 μm / min and controlled etching profile [4]. The

отношением до 30 : 1 [3], скорость травления до 20 мкм / мин, а также контролируемый профиль травления [4]. Основным недостатком процесса является шероховатость стенок (scallops) в связи с цикличностью процесса.

В настоящее время технология формирования глубоких отверстий в кремнии (through-silicon vias, TSV) представляет большой интерес для отечественной микроэлектроники. Основным преимуществом технологии TSV является улучшение характеристик изделий при уменьшении занимаемой площади. Так, фирмы Samsung Electronics [5] (Южная Корея) и Micron Technology [6] (США) разработали чипы памяти с применением технологии TSV, пропускная способность которых была увеличена вплоть до 320 ГБ / с. При этом данные чипы требуют примерно на 70% меньше энергии, чем существующие на данный момент чипы DDR3. Однако необходимое промышленное оборудование может быть представлено только импортными образцами ведущих разработчиков (LAM, SPTS) и имеет большую стоимость.

Целью данной работы была разработка реактора для глубокого травления кремния на пластинах диаметром до 200 мм, аналогичного по своим характеристикам импортному, и разработка технологии глубокого травления кремния для ее применения в изготовлении трехмерных TSV-структур.

Ключевые слова: глубокое травление кремния, Bosch-процесс, трехмерная сборка, 3D-сборка, гладкие щели

Сведения об авторах:

Долгополов Владимир Миронович, кандидат технических наук,

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», 124460, РФ, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: step455@mail.ru;

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

Иракин Павел Александрович, Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», 124460, РФ, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: irakinp@gmail.com;

Варакин Виктор Михайлович, Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», 124460, РФ, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: VarakinVM@yandex.ru;

Шубников Александр Валерьевич, Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», 124460, РФ, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10, e-mail: shybnikov@list.ru

Мицын Никита Геннадьевич, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12 / 1, e-mail: nmitsyn@mikron.ru.

main drawback of the process is the roughness of the walls (scallops) in connection with the cyclical process.

Currently, technology of deep holes etching is of great interest to the domestic microelectronics. The main advantage of TSV technology is improving the characteristics of devices while reducing occupied area. Samsung Electronics [5] (South Korea) and Micron Technology [6] (USA) have developed memory chips using the TSV technology which has a max bandwidth up to 320 GB / sec. This data chips use approximately 70% less power than currently existing DDR3 chips. However, the necessary industrial equipment for 200 mm wafers can be represented only imported models leading developers (LAM, SPTS) and has a greater cost.

The aim of this work was to develop a reactor for deep silicon etching on plates with diameter of up to 200 mm, similar in their characteristics with import and development of technology deep silicon etching for its use in the manufacture of three-dimensional TSV assembly.

Keywords: deep silicon etching, "Bosch" process, three dimensional assembly, 3D-assembly, smooth sidewalls trenches

Data of authors:

Dolgopолов Vladimir Mironovich, candidate of technical Sciences, Research institute of precision machine manufacturing, 10, Panfilovsky prospekt, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: step455@mail.ru;

Odinokov Vadim Vasilievich, doctor of technical Sciences, professor, Research institute of precision machine manufacturing; 10, Panfilovsky prospekt, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: vodinokov@niitm.ru;

Irakin Pavel Aleksandrovich, Research institute of precision machine manufacturing, 10, Panfilovsky prospekt, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: irakinp@gmail.com;

Varakin Viktor Mikhailovich, Research institute of precision machine manufacturing; 10, Panfilovsky prospekt, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: VarakinVM@yandex.ru;

Shubnikov Alexander Valerievich, Research institute of precision machine manufacturing; 10, Panfilovsky prospekt, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: shybnikov@list.ru;

Mitsyn Nikita Gennadievich, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 12 / 1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: nmitsyn@mikron.ru.

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ И СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНОГО ГИДРОКСИАПАТИТА КАЛЬЦИЯ

Применение углеродных нанотрубок находит все более широкое применение в промышленной технологии. Однако их влияние на организм человека до сих пор недостаточно изучено. В данной работе проведена оценка влияния многостенных углеродных нанотрубок (УНТ) на образование нанокристаллического (НК) гидроксиапатита кальция $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (ГА) в ходе синтеза композиционных материалов (КМ) ГА / УНТ (0,1; 1 и 5 масс.% УНТ), моделирующего взаимодействие УНТ с фосфатами кальция костной ткани в ходе биоминерализации. Определено влияние УНТ на кристаллографические, морфологические характеристики и растворимость НК ГА в составе КМ ГА / УНТ.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, гидроксиапатит, композиционные материалы, синтез, свойства

Сведения об авторах:

Захаров Николай Алексеевич, доктор физико-математических наук, Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, 117907, РФ, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д. 31, e-mail: zakharov@igic.ras.ru;

Бокарев Валерий Павлович, кандидат химических наук, АО «НИИМЭ», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12 / 1, e-mail: vbokarev@niime.ru;

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

Нечипоренко Александр Петрович, кандидат технических наук; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12 / 1, e-mail: anechiporenko@niime.ru.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАТРИЧНЫХ СТРУКТУР В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Построена модель прогнозирования влияния локальных напряжений, обусловленных изменениями объемов элементов неоднородности двухкомпонентных матричных композитов, на средние по материалу напряжения. При построении модели полагается, что включения в композитах имеют форму эллипсоидов вращения и ориентированы своими главными полуосями в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Получено расчетное соотношение для определения средних напряжений в рассматриваемых матричных структурах. Выведенное соотношение учитывает ориентацию включений в матрице, термоупругие характеристики и концентрацию компонентов композитов, а также отличие в величине изменения температуры для включений и матрицы. Для модельных композитов на основе полимерного связующего ЭД-20 с включениями из меди проведены численные расчеты по определению средних напряжений в направлениях трех осей системы координат. Исследованы зависимости средних по материалу напряжений от формы, ориентации и концентрации включений, а также от вариаций величины изменения температуры в различных компонентах композитов.

Ключевые слова: матричный композит, термоупругие характеристики, средние напряжения, моделирование

THE EFFECT OF CARBON NANOTUBES ON CRYSTALLIZATION AND PROPERTIES OF NANOSIZED CALCIUM HYDROXYAPATITE

The application of carbon nanotubes is increasingly used in industrial technology. However, their impact on the human body is still insufficiently studied. In this work, we assessed the influence of multi-walled carbon nanotubes (CNTs) on the formation of nanocrystalline (NC) of calcium hydroxyapatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (HA) during the synthesis of composite materials (KM) HA / CNT (0.1; 1 and 5 of the masses.% CNT), modeling the interaction of CNTs with the phosphate of bone calcium in the course of biomineralization. The influence of CNTs on the crystallographic, morphological characteristics, and the solubility of HA in NK, composed of KM HA / CNT.

Keywords: carbon nanotubes, hydroxyapatite, composite materials, synthesis, properties

Data of authors

Zakharov Nikolay Alekseevich, doctor of Physics and Mathematics, Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy Of Sciences, professor, 31, Leninskii pr., Moscow, Russian Federation, 117907, e-mail: zakharov@igic.ras.ru;

Bokarev Valery Pavlovich, candidate of Chemical Sciences, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 12 / 1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russian Federation, 124460, e-mail: vbokarev@niime.ru;

Gornev Eugene Sergeevich, doctor of Engineering Sciences, professor, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 12 / 1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russian Federation, 124460, e-mail: egornev@niime.ru;

Nechiporenko Alexander Petrovich, candidate of Engineering Sciences, "Molecular Electronics Research Institute", Stock Company, 12 / 1, 1st Zapadny proezd, Zelenograd, Moscow, Russian Federation, 124460, e-mail: anechiporenko@niime.ru.

STRESSED STATE OF MATRIX STRUCTURES IN THE CONDITIONS OF EXPOSURE TO THERMODYNAMIC FACTORS

A model for predicting the effect of local stresses due to changes in the volume of the elements of the inhomogeneity of two-component matrix composites on the average stress material is constructed. When building the model, it is assumed that the inclusions in the composites have the form of ellipsoids of rotation and are oriented with their main semi-axes in three mutually perpendicular directions. The calculated ratio for determining the average stresses in the considered matrix structures is obtained. The derived relation considers the orientation of inclusions in the matrix, the thermoelastic characteristics and the concentration of the components of the composites, as well as the difference in the magnitude of the temperature change for the inclusions and the matrix. For model composites based on the ED-20 polymer binder with copper inclusions, numerical calculations were performed to determine the average stresses in the directions of the three axes of the coordinate system. The dependences of the material averages of the stresses on the shape, orientation, and concentration of the inclusions, as well as on the variations in the magnitude of the temperature change in the various components of the composites, are investigated.

Keywords: matrix composite, thermoelastic properties, average stress, modeling

Сведения об авторах:

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

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

Кочетыгов Андрей Александрович, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ, e-mail: aakcht@gmail.com;

Петров Николай Иванович, кандидат физико-математических наук, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9, e-mail: nik_petrov@mail.ru

Data of authors:

Bardushkin Vladimir Valentinovich, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, docent, Professor departments of "Higher mathematics No. 2" and "System environment" quality MIET, "National Research University of Electronic Technology", Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: bardushkin@mail.ru;

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

Kochetygov Andrey Aleksandrovich, "National Research University of Electronic Technology", Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: aakcht@gmail.com;

Petrov Nikolay Ivanovich, candidate of physical and mathematical Sciences, D. I. Mendeleev Russian University of chemical technology, 9, Miusskaya square, Moscow, 125047, e-mail: nik_petrov@mail.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 29.03.2019.

Отпечатано в типографии «Печатных Дел Мастер».
Номер заказа 191674.
✉ 109518, г. Москва, 1-й Грайвороновский проезд, д. 4

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