

## PHYSICAL PHENOMENA

V.N.Mordkovich  
**SOME ASPECTS OF STABLE  
 RADIATION DEFECTS FORMATION  
 IN ION IMPLANTED Si**

In this work we discussed some aspects of stable radiation defects formation in ion implanted Si which are effected on defects formation kinetics, defects properties, concentration and space distribution. Among them are the Si target temperature during implantation, the chemical reactions on Si surface before implantation, the additional in-situ excitation of atom-electron system, the influence of elastic and electric force fields in Si and SiO<sub>2</sub>-Si structures during implantation, the influence of bombarded ions chemical nature.

**Key Words:** Ion implantation, radiation defects, Si, SiO<sub>2</sub>-Si system

V.P.Bokarev, E.S.Gornev, G.Ya.Krasnikov, P.A.Todua  
**ANISOTROPY OF THE ELECTRONIC WORK FUNCTION  
 AND SURFACE ENERGY OF METALS**

Abstract: The specific surface energy of metals anisotropy using coordination crystal melt simulation has been compared with the anisotropy of these facets electron work function. It has shown that the surface energies anisotropy results calculated by this simulation coincide with the experimental values of the anisotropy of work function of metals.

**Key words:** anisotropy, surface energy, electron work function

## DEVELOPMENT AND DESIGNING

A.A.Chouprik, Ph.D., A.S.Baturin, O.M.Orlov, K.V.Bulakh,  
 K.V.Egorov, A.A.Kuzin, D.V.Negrov, S.A.Zaitsev,  
 A.M.Markeev, Ph.D., Yu.Yu.Lebedinskiy, A.V.Zablotskiy

**NON-VOLATILE MEMORY CELLS BASED  
 ON RESISTIVE SWITCH AT THIN GRADIENT TERNARY  
 OXIDE Hf<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>O<sub>y</sub> FILMS**

Prototype of non-volatile resistive switch memory cell based on resistive switch at thin Hf<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>O<sub>y</sub> films with gradient content of Al grown by atomic layer deposition was designed. This prototype imitate placing of memory cells at metallization layers. Considerably lower rewrite voltage and considerably faster rewrite speed then as compared with traditional flash-memory cell was obtained for this prototype.

**Key words:** resistive switch effect, atomic layer deposition, non-volatile memory, hafnium oxide, ReRAM

## ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

В.Н.Мордкович  
**НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОБРАЗОВАНИЯ  
 РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ  
 ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**

Обсуждаются некоторые аспекты образования устойчивых радиационных дефектов в кремнии при ионной имплантации. Приводятся данные о влиянии на кинетику образования радиационных дефектов, их концентрацию и пространственное распределение, а также на концентрацию и распределение легирующей примеси таких факторов, как температура мишени при имплантации, химические реакции на поверхности полупроводника, возбуждение электронной подсистемы атомов кремния в процессе облучения, влияние упругого и электрического силовых полей, возникающих в кремнии в процессе имплантации и присущих системе диэлектрик-кремний.

**Ключевые слова:** Ионная имплантация, радиационные дефекты, кремний, система SiO<sub>2</sub>-Si

В.П.Бокарев, Е.С.Горнев, Г.Я.Красников, П.А.Тодуа  
**АНИЗОТРОПИЯ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ  
 И ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ МЕТАЛЛОВ**

Проведено сопоставление рассчитанной с применением модели координационного плавления кристаллов анизотропии удельной поверхностной энергии металлов с анизотропией работы выхода электронов из данных граней. Показано, что анизотропия поверхностных энергий, рассчитанная по данной модели совпадает с экспериментальными значениями анизотропии работы выхода электронов.

**Ключевые слова:** анизотропия, поверхностная энергия, работа выхода электрона

## РАЗРАБОТКА И КОНСТРУИРОВАНИЕ

А.А.Чуприк, А.С.Батурин, О.М.Орлов, Е.С.Горнев,  
 К.В.Булах, К.В.Егоров, А.А.Кузин, Д.В.Негров, С.А.Зайцев,  
 А.М.Маркеев, Ю.Ю.Лебединский, А.В.Заблоцкий

**ЯЧЕЙКА ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ  
 НА ЭФФЕКТЕ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ  
 В ОКСИДНЫХ ПЛЕНКАХ Hf<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>O<sub>y</sub>**

Разработан прототип ячеек энергонезависимой памяти на эффекте резистивного переключения в оксидных пленках Hf<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>O<sub>y</sub> с переменным (по глубине) содержанием Al, выращенных методом атомно-слоевого осаждения. Данный прототип моделирует размещение ячеек памяти между слоями металлизации интегральных схем. В части повышения скорости перезаписи и снижения напряжения перезаписи полученные результаты существенно превосходят параметры традиционной флэш-памяти.

**Ключевые слова:** эффект резистивного переключения, атомно-слоевое осаждение, энергонезависимая память, оксид гафния, ReRAM

A.V.Zablotckii, A.S.Batutin, A.M.Markeev, S.A.Zaitsev,  
A.V.Shadrin, S.A.Morozov, R.V.Kirtaev, E.S.Gornev,  
O.M.Orlov

### FUNCTIONAL ELEMENTS OF NON-VOLATILE RESISTIVE MEMORY BASED ON HAFNIUM OXIDE AND TITANIUM NITRIDE

In this work the investigations of technologically compatible materials that allow realizing the principle of resistive switching in non-volatile memory cells with accounting the requirements of the production were made. The work demonstrates the feasibility of integrating functional elements ReRAM based on hafnium oxide and titanium nitride with CMOS technology up to 0.18  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** Resistance random access memory, resistive switching, high-k dielectrics, 1T-1R architecture.

G.B.Galiev, A.E.Yadmenev, A.S.Bugaev, Yu.V.Fedorov,  
R.A.Khabibullin, D.S.Ponomarev, P.P. Maltsev

### DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF METAMORPHIC NANOHETEROSTRUCTURES ON GAAS WAFERS FOR mm-WAVE BAND (60–90 GHz)

The metamorphic InAlAs/InGaAs/InAlAs nanoheterostructures with the different indium content (0,30...0,55) have been experimentally investigated. It was also fabricated the field effect transistor with Shottky gate with a length 0,53  $\mu\text{m}$  and width  $2 \times 50 \mu\text{m}$  that demonstrated power gain cut-off frequency of  $f_{\text{max}} = 200$  GHz.

**Key words:** nanoheterostructure,  $\text{A}_3\text{B}_5$  semiconductors, molecular-beam epitaxy, field effect transistor with Shottky gate

## PROCESSES AND TECHNOLOGY

G. Krasnikov, O. Gushin, V. Bliznetsov, L. Kolobova,  
Yu. Gurskiy, A. Elpidiforov, Yu. Gurskiy, Ch. Volk, P. Ignatov

### PLASMA ETCHING PROCESSES FOR TRENCH ISOLATION TECHNOLOGY

The paper presents two production-worthy etching processes for trench isolation technology: etching of trenches in Si, and topography planarization after trench filling. The two processes are performed in simple RF diode reactors. Proposed Si etch process overcomes limitation of Bosch process by using new gas chemistry of  $\text{CF}_3\text{I}/\text{SF}_6$  with photoresist mask. The process with optimized  $\text{CF}_3\text{I}$  content of 50% has Si/photoresist selectivity of 5:1 and yields 1.8  $\mu\text{m}$ -wide trenches with depth up to 8  $\mu\text{m}$ . The trenches have smooth sidewalls with slight positive slope favorable for filling by sequence of dielectric and poly-Si layers. Proposed new planarization approach for poly-Si, instead of deposition and etchback of photoresist, employs sacrificial layer of thin SiN, thus, improving throughput and uniformity. For optimal SiN thickness of 300 nm and selectivity of poly-Si/SiN of 3:1 in  $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3\text{-SF}_6$  chemistry, the process with spectral endpoint detection achieves final topography on the wafer  $\leq 50$  nm.

**Key words:** plasma etching, trench isolation, planarization,  $\text{CF}_3\text{I}$ , etch selectivity

А.В.Заблоцкий, А.С.Батулин, А.М.Маркеев, С.А.Зайцев,  
А.В.Шадрин, С.А.Морозов, Р.В.Киртаев, Е.С.Горнев,  
О.М.Орлов

### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ РЕЗИСТИВНОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГАФНИЯ И НИТРИДА ТИТАНА

В работе проведены поисковые исследования технологически совместимых материалов, позволяющих реализовать принцип резистивного переключения при создании ячеек энергонезависимой памяти с учетом требований производства. В работе продемонстрирована практическая возможность интеграции функциональных элементов ReRAM на основе оксида гафния и нитрида титана с КМОП-технологией уровня 0,18 мкм.

**Ключевые слова:** память на основе резистивного переключения, резистивные переключения, high-k диэлектрики, архитектуры 1Т-1R

Г.Б.Галиев, А.Э.Ячменев, А.С.Бугаев, Ю.В.Федоров,  
Р.А.Хабибуллин, Д.С.Пономарев, П.П.Мальцев

### РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАМОРФНЫХ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ ПРИБОРОВ мм-ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН (60–90 ГГц)

Экспериментально исследована серия метаморфных наногетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs с различным содержанием индия в метаморфном буферном слое (0,30...0,55). Разработан полевой транзистор с барьером Шоттки с периферией  $2 \times 50$  мкм, длиной затвора 0,53 мкм и предельной частотой усиления по мощности  $f_{\text{max}} = 200$  ГГц.

**Ключевые слова:** наногетероструктура,  $\text{A}_3\text{B}_5$ , молекулярно-лучевая эпитаксия, полевой транзистор с затвором Шоттки

## ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИЯ

Красников Г.Я., Близнецов В.Н., Гушин О.П.,  
Колобова Л.А., Волк Ч.П., Гурский Ю.Н.,  
Елпидифоров А.В., Игнатов П.В.

### ПРОЦЕССЫ ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ЩЕЛЕВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В статье кратко представлен разработанный промышленный процесс формирования щелевой изоляции путем глубинного травления кремния с последующим заполнением канавок поликремнием и его плазменной планаризацией. Описаны и проанализированы экспериментальные данные, полученные на групповой установке реактивного ионного травления при травлении канавок в кремнии. Установлена важная роль галогена йода в плазме газовой смеси для улучшения селективности и анизотропии, а также профиля канавки с гладким и ровным краем.

**Ключевые слова:** плазменное травление, щелевая изоляция,  $\text{CF}_3\text{I}$ , селективность травления

Yayi Wei, Chao Zhao, Tianchun Ye  
**ANALYSIS OF MIX-AND-MATCH  
 LITHO APPROACH**

**FOR MANUFACTURING 20nm LOGIC NODE PRODUCTS**

Due to resolution limitation of 1.35NA 193nm immersion lithography, double-exposure and double-patterning (DP) are widely used in 20nm logic process. We propose to replace these DP layers with multi e-beam lithography, i.e. combining two photo masks into one e-beam exposure layer. Our analysis suggests that current multi e-beam tool has the resolution capability to expose these combined layers. The major concern is the mix-and-match overlay, which should be addressed by further improvement of alignment hardware and establishment of an advanced process control system. We believe that the mixing of e-beam and photolithography offers an alternative lithography solution for manufacturing 20nm logic products in small volume.

**Key words:** 20nm logic node, e-beam lithography, maskless, mix-and-match

Mikhail R. Baklanov  
**MATERIALS WITH LOW DIELECTRIC CONSTANT  
 FOR NANOELECTRONICS**

**Abstract:** The paper is an introduction to technology of materials with low dielectric constant developed for interconnects in modern integrated circuits with the purpose of increasing their speed. Different types of low-k materials have been studied and developed during the last 15 years for the technology nodes from 65 to 10 nm when the role of low-k materials has been becoming more and more important. It is shown that the industrial implementation of these materials has been very challenging although the materials with  $k > 2,5$  are already used in production. The main challenges of low-k integration are discussed as well as the general tendencies in selection and development for different technology nodes.

**Key words:** interconnects, integrated circuits, low-k materials

**MATHEMATICAL SIMULATION**

**THE ION-FLYING MODEL OF IMPLANTATION  
 FORMULATED BY MEANS OF CELLULAR AUTOMATA**

The article describes the ion-flight part of the cellular automaton model of ion implantation. Computational experiments were carried out in two-dimensional space on a hexagonal grid. The results obtained are in good agreement with published data on the spatial distribution of stopped ions that speaks about the applicability of the cellular automata in the field of ion implantation.

**Keywords:** ion-implantation, cellular automata

Йаи Вэй, Чао Джао, Тяньчун Йе  
**АНАЛИЗ СМЕШАННОГО (MIX AND MATCH)  
 ЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

**ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА 20-НМ ЛОГИКИ**

Из-за ограничений иммерсионной литографии на длине волны 193 нм с относительным отверстием (NA) 1,35 при производстве 20-нм логики широко используется двойное экспонирование и двойная литография. Мы предлагаем заменить двойную литографию на многолучевую электронную литографию, то есть использовать вместо двух масок однократное экспонирование электронными лучами. Наш анализ показывает, что существующая на сегодняшний день установка многолучевой электронной литографии обладает достаточным разрешением для экспонирования таких слоев. Основной проблемой является совмещение слоев, полученных при помощи обычной литографии и электронной литографии. Совмещение может быть улучшено дальнейшим прогрессом как в аппаратной части так и в процессах производственного контроля. Мы убеждены, что совместное использование классической и многолучевой электронной литографии (Mix and Match) является эффективным альтернативным решением в производстве небольших объемов 20-нм логики.

**Ключевые слова:** логика 20-нм, электронная литография, безмасочная литография, смешение и подгонка, основания-стержни (мендрелы)

Михаил Р. Бакланов  
**МАТЕРИАЛЫ С НИЗКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
 ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ ДЛЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

Настоящая статья является введением в технологию материалов с низкой диэлектрической проницаемостью разрабатываемых для межсоединений современных интегральных схем с целью увеличения их быстродействия. В статье рассматриваются разные типы материалов, которые исследовались в течение последних 15 лет. Анализируются разные low-k материалы, разработанные для поколений технологии от 65 до 10 нм. Показано, что их внедрение в промышленность остается чрезвычайно трудным, хотя материалы с диэлектрической постоянной  $> 2,5$  уже внедрены в производство. В работе упомянуты причины этих трудностей, показаны главные тенденции в их подборе и разработке для различных поколений технологии.

**Ключевые слова:** интегральная схема, межсоединения, материалы с низкой диэлектрической постоянной

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Матюшкин И.В., Коробов С.В., Михайлов А.Н., Гусейнов Д.В.

**ИОННО-ПРОЛЕТНАЯ МОДЕЛЬ ИМПЛАНТАЦИИ,  
 СФОРМУЛИРОВАННАЯ НА ЯЗЫКЕ КЛЕТОЧНЫХ  
 АВТОМАТОВ**

В статье рассмотрена ионно-пролетная часть клеточно-автоматной модели процесса ионной имплантации. Вычислительные эксперименты проводились в двумерном пространстве на гексагональной сетке. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными по пространственному распределению остановленных ионов, что говорит о применимости клеточного аппарата в области ионной имплантации.

**Ключевые слова:** ионная имплантация, клеточные автоматы

## RELIABILITY

## НАДЕЖНОСТЬ

Vysikaylo P.I., Mitin V.S., Mitin A.V., Krasnobaev N.N.,  
Belyaev V.V.

### ON THE COATING ADHESION MECHANISM FOR INORGANIC DIELECTRIC SUBSTRATE

TO ENHANCE METALLIZATION QUALITY OF MICROWAVE  
TRANSISTORS COOLING

Part 1. THEORETICAL APPROACH TO THE PROBLEM OF MICROWAVE  
TRANSISTORS COOLING BY USING CERAMIC HEAT SINKS

Analytically analyzed, and the mechanism of adhesion of the metal coating to a ceramic substrate for example beryllium oxide. This adhesion mechanism is based on the increase in the concentration of structural defects (vacancies) and electron exchange interaction couples metal-oxide beryllium thermal activation process. An analytical dependence on it calculated the boundary conditions on the example of titanium atoms and beryllium oxide, justifying the optimum mode of coating deposition (heating temperature, deposition time, the activation energy). The substrate temperature for a perfect surface in the case of beryllium oxide, according to the analytical calculations is 1230K

**Keywords:** high power microwave devices, diffusion of vacancies, the mechanism and kinetics of the formation of adhesions, the power plane

Vysikaylo P.I., Mitin V.S., Mitin A.V., Krasnobaev N.N.,  
Belyaev V.V.

### ON THE COATING ADHESION MECHANISM FOR INORGANIC DIELECTRIC SUBSTRATE

TO ENHANCE METALLIZATION QUALITY  
OF MICROWAVE TRANSISTORS COOLING

Part 2. EXPERIMENTAL STUDIES OF METAL COVER ADHESION AND  
SOLUTIONS OF COOLING POWER MICROWAVE TRANSISTORS

It is experimentally investigated previously proposed mechanism of adhesion of the metal coating to a ceramic substrate for example beryllium oxide. This adhesion mechanism is based on the increase in the concentration of structural defects (vacancies) and electron exchange interaction couples metal-oxide beryllium thermal activation process. Previously proposed analytical dependence and the settlement of its boundary conditions on the example of titanium atoms and beryllium oxide, justifying the optimum mode of coating deposition (heating temperature, deposition time, the activation energy) with a maximum adhesion of the metal coating in good agreement with experimental studies. The substrate temperature for the ideal surface and the maximum adhesion of the metal coating in the case of beryllium oxide, according to the analytical calculations is 1230K and the temperature observed in experiments about 1380K.

**Key words:** high power microwave devices, diffusion of vacancies, the mechanism and kinetics of the formation of adhesions, the power plane.

Ф.И.Высикайло, В.С.Митин, А.В.Митин,  
Н.Н.Краснобаев, В.В.Беляев

### О МЕХАНИЗМЕ АДГЕЗИИ ПОКРЫТИЯ К ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ ИЗ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛИЗАЦИИ  
ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ

Ч.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

ОХЛАЖДЕНИЯ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ НА ПРИМЕРЕ КЕРАМИЧЕСКИХ  
ТЕПЛОТОВОДОВ

Аналитически проведен анализ и предложен механизм адгезии металлического покрытия к керамической подложке на примере оксида бериллия. Этот механизм адгезии основывается на увеличении концентрации структурных дефектов (вакансий) и электронно-обменном взаимодействии пары металл-оксид бериллия при температурной активации процесса. Предложена аналитическая зависимость и проведен расчет по ней граничных условий на примере атомов титана и оксида бериллия, обосновывающий оптимальный режим осаждения покрытия (температура нагрева, время осаждения, энергия активации). Температура подложки для идеальной поверхности в случае оксида бериллия согласно аналитическим расчетам равна 1230 K.

**Ключевые слова:** мощные СВЧ-устройства, диффузия вакансий, механизм и кинетика образования адгезии, силовой слой

Ф.И.Высикайло, В.С.Митин, А.В.Митин,  
Н.Н.Краснобаев, В.В.Беляев

### О МЕХАНИЗМЕ АДГЕЗИИ ПОКРЫТИЯ К ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ ИЗ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛИЗАЦИИ  
ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ

Ч.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АДГЕЗИИ

МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ И РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ  
ОХЛАЖДЕНИЯ МОЩНЫХ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ

Экспериментально исследован ранее предложенный механизм адгезии металлического покрытия к керамической подложке на примере оксида бериллия. Этот механизм адгезии основывается на увеличении концентрации структурных дефектов (вакансий) и электронно-обменном взаимодействии пары металл-оксид бериллия при температурной активации процесса. Предложенная ранее аналитическая зависимость и проведенный расчет по ней граничных условий на примере атомов титана и оксида бериллия, обосновывающий оптимальный режим осаждения покрытия (температура нагрева, время осаждения, энергия активации) с максимальным значением адгезии металлического покрытия хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями. Температура подложки для идеальной поверхности и максимальным значением адгезии металлического покрытия в случае оксида бериллия согласно аналитическим расчетам равна 1230 K, а в экспериментах наблюдается температура порядка 1380 K.

**Ключевые слова:** мощные СВЧ-устройства, диффузия вакансий, механизм и кинетика образования адгезии, силовой слой