

НАНО-
ТЕХНОЛОГИИ
В
МИКРО-
ЭЛЕКТРОНИКЕ

НАУКА

NANO- TECHNOLOGY in MICRO- ELECTRONICS

Edited by

*Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,
Doctor of Technical Sciences, Professor O.A. AGEEV,
Doctor of Technical Sciences, Professor B.G. KONOPLEV*

MOSCOW NAUKA 2019

НАНО- ТЕХНОЛОГИИ В МИКРО- ЭЛЕКТРОНИКЕ

*Под редакцией
член-корреспондента РАН,
доктора технических наук, профессора О.А. АГЕЕВА,
доктора технических наук, профессора Б.Г. КОНОПЛЁВА*

МОСКВА НАУКА 2019

УДК 621.38
ББК 32.844.1
Н25



*Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований по проекту № 19-17-00004,
не подлежит продаже*

Авторы:

Авдеев С.П., Авилов В.И., Агеев В.О., Агеев О.А., Алябьева Н.И., Балакирев С.В.,
Блинов Ю.Ф., Бондарев Ф.М., Быков Ал. В., Вакулов З.Е., Варзарев Ю.Н., Волков Е.Ю.,
Громов А.Л., Гусев Е.Ю., Денисенко М.А., Ежова О.А., Еременко М.М., Житяев И.Л.,
Житяева Ю.Ю., Замбург Е.Г., Ильина М.В., Ильин О.И., Исаева А.С., Климин В.С.,
Коломийцев А.С., Коноплёв Б.Г., Коц И.Н., Лисицын С.А., Лысенко И.Е., Михайлин И.А.,
Михайличенко А.В., Писаренко И.В., Приступчик Н.К., Рудык Н.Н., Рындин Е.А.,
Смирнов В.А., Светличный А.М., Солодовник М.С., Сюрик Ю.В., Томинов Р.В.,
Федотов А.А., Хахулин Д.А., Чередниченко Д.И.

Нанотехнологии в микроэлектронике / Под ред. О.А. Агеева, Б.Г. Коноплёва. – М. :
Наука, 2019. – 511 с. – ISBN 978-5-02-040201-0

В книге представлены результаты междисциплинарных фундаментальных, поисковых и прикладных научных исследований по разработке технологий получения новых наноматериалов и элементной базы электронных устройств новых поколений информационно-телекоммуникационных систем. Рассмотрены возможности практического применения методов проектирования и изготовления сверхбыстродействующих интегральных элементов СБИС и УБИС, многоосевых микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений, устройств нанопьезотроники, микроэлектронной сенсорики, нейроморфных систем и вакуумной микроэлектроники на основе использования перспективных методов нанотехнологии: молекулярно-лучевой эпитаксии, импульсного лазерного осаждения, плазмохимического осаждения из газовой фазы, сканирующей зондовой микроскопии и зондовой нанолитографии, фокусированных ионных пучков, электронно-лучевой обработки, а также перспективных методов планарной технологии поверхностной обработки.

Для научных работников и инженеров, специализирующихся в области применения нанотехнологий в микроэлектронике, а также для студентов и аспирантов соответствующего профиля.

Nanotechnology in microelectronics / Ed. by O.A. Ageev, B.G. Konoplev. – M. : Nauka,
2019. – 511 p. – ISBN 978-5-02-040201-0

The results of interdisciplinary fundamental, search and applied scientific research on the development of technologies for obtaining new nanomaterials and the elemental base of electronic devices of new generations of information and telecommunication systems are presented. They expand the possibilities of practical application of the methods of design and manufacturing of ultrafast integral elements of VLSI and ULSI, multi-axis micro-mechanical sensors of angular velocities and linear accelerations, nanoprobe devices, microelectronic sensors, neuromorphic systems and vacuum micro-electronics based on the use promising methods of nanotechnology – molecular-beam epitaxy, pulsed laser deposition, plasma-enhanced chemical vapor deposition, scanning probe microscopy and probe nanolithography, focused ion beams, electron beam processing, and promising methods for the planar surface treatment technology. The monograph characterizes the focus on investigation of ways of solving specific problems arising in the formation of nanostructures and devices based on them, as well as assessing the prospects and difficulties of introducing the developed technologies and methods into industrial technologies.

For scientists and engineers specializing in the field of nanotechnology in microelectronics, students and graduate students of the appropriate profile.

ISBN 978-5-02-040201-0

© Южный федеральный университет, 2019
© ФГУП Издательство «Наука», редакционно-издательское оформление, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редакторов	5
Глава 1	
Получение вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методом плазмохимического осаждения из газовой фазы.....	9
Введение	9
1.1. Термодинамический анализ процессов в структуре катализатор/подслой/подложка при выращивании углеродных нанотрубок методом осаждения из газовой фазы.....	10
1.2. Теоретические основы формирования каталитических центров при термообработке металлических пленок	16
1.3. Исследование технологических режимов формирования каталитических центров и роста углеродных нанотрубок методом плазмохимического осаждения из газовой фазы.....	25
Заключение.....	45
Литература.....	47
Глава 2	
Методика нанодиагностики параметров вертикально ориентированных углеродных нанотрубок на основе методов сканирующей зондовой микроскопии	51
Введение	51
2.1. Экспериментальные образцы и оборудование	52
2.2. Методика определения высоты массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок.....	53
2.3. Методика определения модуля Юнга и жесткости на изгиб углеродных нанотрубок.....	56
2.4. Методика определения удельного сопротивления углеродных нанотрубок...	62
2.5. Методика определения адгезии углеродных нанотрубок к подложке.....	69
Заключение.....	74
Литература.....	74
Глава 3	
Ориентированные углеродные нанотрубки как перспективный материал нанопьезотроники и наноэлектроники	78
Введение	78
3.1. Теоретические основы создания приборов и устройств нанопьезотроники на основе ориентированных углеродных нанотрубок	79
3.1.1. Деформация УНТ под действием локального внешнего электрического поля.....	80
3.1.2. Поляризация и накопление пьезоэлектрического заряда в УНТ	88
3.1.3. Модель мемристорного эффекта в неравномерно деформированной УНТ.....	93
	505

3.2. Исследование мемристорного эффекта в ориентированных УНТ и структурах на их основе.....	98
Заключение.....	110
Литература.....	112
Глава 4	
Формирование самоорганизующихся наноструктур A3B5 методом молекулярно-лучевой эпитаксии.....	115
Введение.....	115
4.1. Формирование наноструктур в системе GaAs-оксид.....	116
4.2. Исследование процессов эпитаксиального роста GaAs на поверхностях с различной кристаллографической ориентацией.....	128
4.3. Исследование процессов капельной эпитаксии в системе In/GaAs(001).....	139
Литература.....	149
Глава 5	
Импульсное лазерное осаждение нанокристаллических пленок ZnO.....	154
Введение.....	154
5.1. Исследование равномерности осаждения пленок методом импульсного лазерного осаждения.....	156
5.2. Исследования режимов формирования нанокристаллических пленок ZnO методом импульсного лазерного осаждения.....	165
5.3. Исследование стабильности зависимости удельного сопротивления при термоциклировании нанокристаллических пленок ZnO.....	178
5.4. Применение нанокристаллических пленок ZnO в нанoeлектронике.....	186
Заключение.....	192
Литература.....	193
Глава 6	
Профилирование поверхности подложек методом фокусированных ионных пучков.....	197
6.1. Основы метода фокусированных ионных пучков.....	197
6.2. Моделирование процессов наноразмерного профилирования поверхности подложек методом фокусированных ионных пучков.....	199
6.3. Исследование режимов наноразмерного профилирования поверхности подложек методом фокусированных ионных пучков.....	212
6.4. Применение фокусированных ионных пучков при создании элементов нанoeлектроники и наносистемной техники.....	229
Заключение.....	236
Литература.....	237
Глава 7	
Исследование мемристорного эффекта в оксидных наноразмерных структурах титана.....	240
Введение.....	240
7.1. Моделирование физико-химических процессов формирования оксидных наноразмерных структур титана методом локального анодного окисления.....	241
7.1.1. Анализ процессов при локальном анодном окислении титана.....	242
7.1.2. Моделирование процесса локального анодного окисления титана.....	253
7.2. Исследование закономерностей формирования оксидных наноразмерных структур титана методом локального анодного окисления.....	263
7.3. Исследование фазового состава оксидных наноразмерных структур титана, полученных методом локального анодного окисления.....	274

7.4. Исследование мемристорного эффекта оксидных наноразмерных структур титана	280
7.5. Макет элемента резистивной памяти на основе мемристорных структур ОНС титана	287
Заключение.....	290
Литература.....	291

Глава 8

Формирование атомарно-гладких поверхностей монокристаллических подложек карбида кремния электронно-лучевой обработкой	295
Введение	295
8.1. Влияние поверхности подложек карбида кремния на формирование микро- и наноструктур	297
8.2. Технологическое оборудование электронно-лучевой обработки	299
8.3. Физико-химические процессы формирования поверхности подложек карбида кремния при электронно-лучевой обработке.....	300
8.4. Исследование влияния электронно-лучевой обработки на параметры поверхности подложек карбида кремния	316
8.5. Разработка технологического процесса электронно-лучевого формирования поверхности монокристаллических подложек карбида кремния	328
Заключение.....	329
Литература.....	330

Глава 9

Исследование электропроводности полимерных нанокомпозитов с углеродными наноструктурами.....	336
Введение	336
9.1. Моделирование зависимости электропроводности полимерных нанокомпозитов от концентрации углеродных наноструктур	342
9.2. Моделирование зависимости электропроводности полимерных нанокомпозитов с графеном от температуры	357
Литература.....	373

Глава 10

Автоэмиссионные наноструктуры на основе пленок графена на карбиде кремния	377
Введение	377
10.1. Моделирование автоэмиссионных наноструктур с катодами в форме острия	378
10.2. Исследование пленок графена на карбиде кремния	387
10.3. Исследование автоэмиссионных катодов на основе пленок графена на карбиде кремния.....	393
Заключение.....	403
Литература.....	404

Глава 11

Сверхбыстродействующие интегральные элементы с управляемой пространственной передислокацией максимума плотности носителей заряда в связанных квантовых областях.....	411
Введение	411
11.1. Интегральные логические элементы на основе туннельно-связанных квантовых областей	412
11.2. Интегральные коммутаторы с управляемой пространственной передислокацией максимума плотности носителей заряда в квантовых областях.....	426
	507

11.3. Сверхбыстродействующие инжекционные лазеры с управляемой пространственной передислокацией максимумов плотности носителей заряда в квантовых ямах	436
11.4. Быстродействующие фотоприемники интегральных систем оптической коммутации.....	454
Заключение.....	458
Литература.....	459

Глава 12

Микро- и наномеханические гироскопы и акселерометры: принципы построения и технологии изготовления.....	462
12.1. Разработка и исследование микромеханических функционально-интегрированных микро- и наномеханических гироскопов-акселерометров с несколькими осями чувствительности.....	462
12.2. Технология изготовления экспериментальных образцов микро- и наномеханических гироскопов и акселерометров.....	479
12.2.1. Унифицированный технологический маршрут изготовления инерциальных датчиков.....	479
12.2.2. Формирование туннельно-эмиссионной структуры наномеханического акселерометра методом фокусированных ионных пучков	482
12.2.3. Экспериментальные образцы микро- и наномеханических гироскопов и акселерометров	485
12.3. Устройства обработки сигналов емкостных преобразователей микро- и наносистем.....	488
Заключение.....	496
Литература.....	497
Сведения об авторах.....	501

Contents

Foreword	5
Chapter 1	
Vertically aligned carbon nanotubes production by plasma enhanced chemical vapor deposition method	9
Introduction	9
1.1. Thermodynamic analysis of processes in the catalyst/sublayer/substrate structure during carbon nanotubes growth by plasma enhanced chemical vapor deposition method	10
1.2. Fundamentals of the theory of the formation of catalytic centers during heat treatment of metal films	16
1.3. Study of the technological modes of the catalytic centers formation and the carbon nanotubes growth by plasma enhanced chemical vapor deposition method	25
Conclusion	45
References	47
Chapter 2	
Nanodiagnostics techniques of vertically aligned carbon nanotubes parameters based on scanning probe microscopy	51
Introduction	51
2.1. Experimental samples and equipment	52
2.2. Techniques for determining the height of vertically aligned carbon nanotubes array	53
2.3. Techniques for determining the Young's modulus and bending stiffness of carbon nanotubes	56
2.4. Techniques for determining the resistivity of carbon nanotubes	62
2.5. Techniques for determining the adhesion of carbon nanotubes to a substrate	69
Conclusion	74
References	74
Chapter 3	
Aligned carbon nanotubes as a promising material for nanopiezotronics and nanoelectronics	78
Introduction	78
3.1 Theoretical bases of creation of nanopiezotronics devices based on aligned carbon nanotubes	79
3.1.1. The strain of a CNT under action a local external electric field	80
3.1.2. Polarization and accumulation of the piezoelectric charge in a CNT	88
3.1.3. Model of the memristor effect in the nonuniform elastic strained CNT	93
3.2. Study of the memristor effect in aligned CNTs and in structures based on them	98
Conclusion	110
References	112
Chapter 4	
Formation of A3B5 self-organized nanostructures by molecular beam epitaxy	115
Introduction	115

4.1. Nanostructure formation in the GaAs-oxide system	116
4.2. Study of GaAs epitaxial growth processes on surfaces with different crystallographic orientation	128
4.3. Study of the droplet epitaxy processes in the system In/GaAs(001)	139
References	149
Chapter 5	
Pulsed laser deposition of ZnO nanocrystalline films	154
Introduction	154
5.1. Heterogeneity of films fabricated by pulsed laser deposition	156
5.2. Fabrication modes of ZnO nanocrystalline films by pulsed laser deposition	165
5.3. Thermal stability of the nanocrystalline ZnO films resistivity	178
5.4. Application of ZnO nanocrystalline films in nanoelectronics	186
Conclusion	192
References	193
Chapter 6	
Surface profiling by focused ion beam	197
6.1. Fundamentals of focused ion beam technology	197
6.2. Modeling of nanoscale substrate surface profiling using focused ion beam	199
6.3. Study of modes of nanoscale substrate surface profiling using focused ion beam	212
6.4. The use of focused ion beams for fabrication of nanoelectronics and nanosystems technology devices	229
Conclusion	236
References	237
Chapter 7	
Investigation of the memristor effect in titanium oxide nanoscale structures	240
Introduction	240
7.1. Simulation of physical and chemical processes of the titanium oxide nanoscale structures formation by local anodic oxidation	241
7.1.1. Analysis of the local anodic oxidation processes of titanium	242
7.1.2. Simulation of the local anodic oxidation process of titanium	253
7.2. Investigation of the regularities of the formation of titanium oxide nanoscale structures by local anodic oxidation	263
7.3. Study of the phase composition of titanium oxide nanoscale structures obtained by local anodic oxidation	274
7.4. Study of the memristor effect of titanium oxide nanoscale structures	280
7.5. Layout of a resistive memory element based on titanium oxide memristor structures	287
Conclusion	290
References	291
Chapter 8	
Preparation of atomically flat surfaces silicon carbide single crystal substrates by electron-beam processing	295
Introduction	295
8.1. Influence of the silicon carbide surface state on the micro- and nanostructures fabrication	297
8.2. Electron-beam processing equipment	299
8.3. Physicochemical processes of the surface formation on silicon carbide substrates during electron beam processing	300
8.4. Effect of electron-beam processing on the surface parameters of silicon carbide substrates	316
8.5. Development of surface preparation technique for silicon carbide single crystal substrates by electron beam	328

Conclusion	329
References	330
Chapter 9	
Electrical conductivity of polymer nanocomposites with carbon nanostructures.....	336
Introduction	336
9.1. A model for dependence of the electrical conductivity of polymer nanocomposites with carbon nanostructures on their concentration	342
9.2. A model for dependence of the electrical conductivity of polymer nanocomposites with graphene on temperature	357
References	373
Chapter 10	
Field emission nanostructures based on graphene films on silicon carbide	377
Introduction	377
10.1. Simulation of field emission nanostructures with point cathodes	378
10.2. Study of graphene films on silicon carbide	387
10.3. Study of field emission cathodes based on graphene films on silicon carbide	393
Conclusion	403
References	404
Chapter 11	
High-speed integrated elements with controlled spatial relocation of carrier density maximum in connected quantum regions.....	411
Introduction	411
11.1. Integrated logic elements on the basis of tunneling connected quantum regions.....	412
11.2. Integrated switches with controlled spatial relocation of carrier density maximum in quantum regions	426
11.3. High-speed injection lasers with controlled spatial relocation of carrier density maximums in quantum wells	436
11.4. High-speed photodetectors of integrated optical switching systems	454
Conclusion	458
References	459
Chapter 12	
Micro- and nano-mechanical gyroscopes and accelerometers: design principles and manufacturing technology	462
12.1. Development and research of functionally integrated micromechanical micro- and nanomechanical gyroscopes-accelerometers with several axes of sensitivity	462
12.2. Manufacturing technology of experimental samples of micro- and nanomechanical gyroscopes and accelerometers	479
12.2.1. Unified technological route for manufacturing inertial sensors	479
12.2.2. Formation of the tunnel-emission structure of a nanomechanical accelerometer using the method of focused ion beams (FIB)	482
12.2.3. Experimental samples of micro- and nanomechanical gyroscopes and accelerometers	485
12.3. Signal processing devices for capacitive converters of micro- and nanosystems.....	488
Conclusion	496
References	497
Information about authors	501