

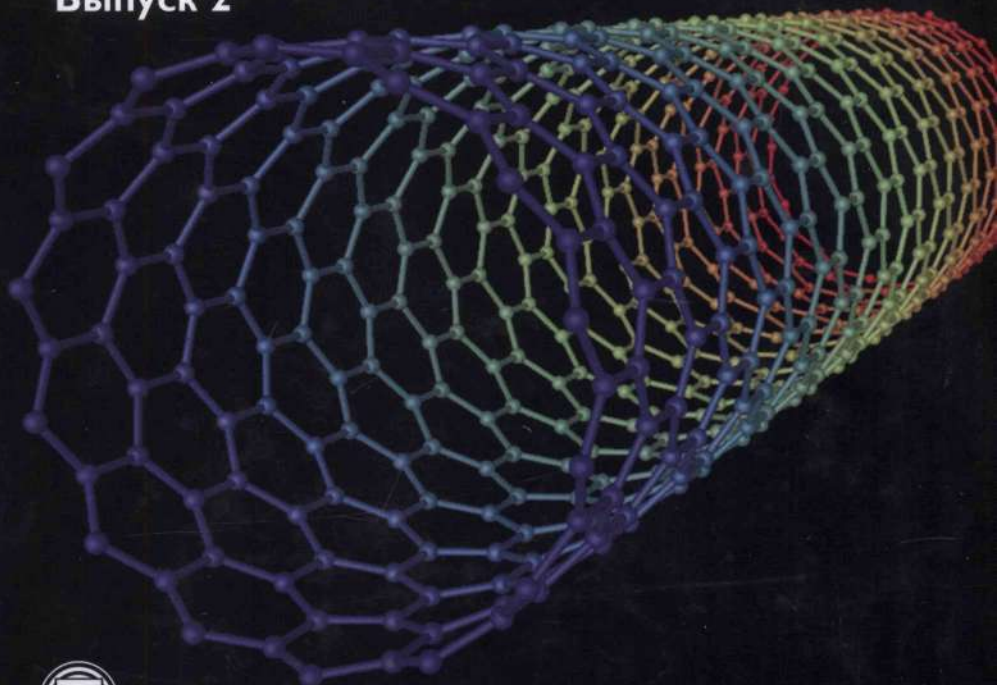


M

Под редакцией  
Ю.А. ЧАПЛЫГИНА

# НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Выпуск 2



ТЕХНОСФЕРА



# **МИР** **электроники**

**Нанотехнологии  
в электронике**

**Выпуск 2**

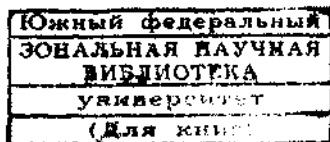
**под редакцией  
члена–корреспондента РАН  
Ю.А. Чаплыгина**

**ТЕХНОСФЕРА**

**Москва**

**2013**

УДК 620.3  
ББК 32.85  
Н25



М-14063

*Рецензент: академик РАН Ю.В. Гуляев*

**Н25 Нанотехнологии в электронике**

**Выпуск 2**

Под редакцией чл.-корр. РАН Ю.А. Чаплыгина

Москва: Техносфера, 2013. – 688с. ISBN 978-5-94836-353-0

Настоящее издание – второй выпуск книги «Нанотехнологии в электронике», вышедшей несколько лет назад. Каждую из частей книги представляет группа авторов, активно развивающих данное направление в Национальном исследовательском университете «МИЭТ».

Коллектив авторов старался осуществить частичную преемственность материала, содержащегося в первом выпуске, однако структура книги существенно изменилась: группировка статей по условным разделам (теоретико-экспериментальные работы, методы исследований, технологии, приборы и устройства) представляется более правильной с точки зрения понимания общего направления работ в МИЭТ.

Каждая из работ представляет собой законченный научный труд обзорного или обобщающего характера, либо является частью оригинальных исследований, полученных в последние 3-5 лет.

Книга представляет интерес для специалистов, аспирантов и студентов, работающих в области нанотехнологий и смежных областях.

УДК 620.3  
ББК 32.85

© 2013, МИЭТ  
© 2013, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-353-0

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	7
<b>Глава 1. Резонансно-туннельные гетероструктуры: физика и приборные применения</b> .....	13
1.1. Особенности одномерной задачи рассеяния и новые типы резонансов в полупроводниковых наногетероструктурах .....	17
1.2. Коллапс резонансов в резонансно-туннельных гетероструктурах .....	22
1.3. Моделирование динамических характеристик резонансно-туннельных гетероструктур на основе численного решения нестационарного уравнения Шредингера .....	34
1.4. Резонансно-туннельные диоды и интегральные схемы на их основе .....	46
Литература .....	58
<b>Глава 2. Электрофизические характеристики неоднородных диэлектриков микро- и нанoeлектроники</b> .....	63
2.1. Электрофизические характеристики диэлектриков .....	63
2.2. Методы описания свойств неоднородных диэлектриков .....	70
2.3. Частотная дисперсия эффективных диэлектрических характеристик .....	77
2.4. Эффективные характеристики диэлектрических наноструктур .....	84
Литература .....	90
<b>Глава 3. Моделирование элементов интегральной нанoeлектроники</b> .....	93
3.1. Наноразмерные транзисторы в КМОП ИС .....	94
3.2. Модели наноразмерных МДП-транзисторов с непланарным затвором .....	101
3.3. Тепловые эффекты в тонкопленочных транзисторных структурах .....	105
3.4. Моделирование интегральных наноструктур в среде TCAD .....	111
Авторы .....	125
Литература .....	126
<b>Глава 4. Размерный эффект плавления в пленочных структурах нанoeлектроники</b> .....	136
4.1. Физико-химическое обоснование размерного эффекта плавления тонкой пленки .....	137
4.2. Размерный эффект плавления в алюминиевой металлизации интегральных схем .....	155

4.3. Размерный эффект плавления в медной металлизации интегральных схем .....	158
4.4. Использование размерного эффекта плавления тонкой пленки для заполнения медью узких траншей в технологии damascene .....	163
4.5. Использование размерного эффекта плавления тонкой пленки для формирования массива нанокластеров .....	165
4.6. Использование размерного эффекта плавления тонкой пленки для сращивания подложек .....	170
Автор .....	174
Литература .....	175
<b>Глава 5. Исследование наноразмерных областей методами просвечивающей электронной микроскопии .....</b>	<b>178</b>
5.1. Основы электронной микроскопии .....	180
5.2. Дифракция электронов и электронно-микроскопический контраст .....	194
5.3. Идентификация структуры аморфного материала вблизи границы с кристаллом .....	206
5.4. Электронная микроскопия пироуглеродных материалов .....	212
Литература .....	221
<b>Глава 6. Рентгеновские методы исследования наноструктур и нанообъектов электроники .....</b>	<b>227</b>
Введение .....	227
6.1. Современные задачи рентгеновской метрологии в микро- и нанoeлектронной технологии .....	229
6.2. Основные конструктивные и исследовательские возможности современного многофункционального рентгеновского исследовательского оборудования .....	233
6.3. Двухволновая относительная рентгеновская рефлектометрия скользящего падения .....	236
6.4. Дифракция и малоугловое рассеяние рентгеновских лучей .....	254
6.5. Повышение эффективности решения обратных рентгеновских задач при использовании параллельных вычислений на графических процессорах .....	257
6.6. Организация удаленного массового доступа к уникальному рентгеновскому оборудованию, сопряженному с виртуальной обучающей системой .....	261
Заключение .....	263
Авторы .....	264
Литература .....	264
<b>Глава 7. Наноструктуры на основе метода локального зондового окисления .....</b>	<b>268</b>
7.1. Метод локального зондового окисления .....	271
7.2. Физико-химическая модель процесса локального зондового окисления, учитывающая приборное ограничение величины тока .....	273

7.3. Исследование влияния конструктивных параметров проводящих кан- тилерверов на параметры процесса локального зондового окисления. . . . .	275
7.4. Исследование влияния фотоактивации на кинетику локального зондового окисления. . . . .	285
Авторы . . . . .	289
Литература . . . . .	289
<b>Глава 8. Плазменные методы создания наноструктур. . . . .</b>	<b>292</b>
Введение. . . . .	292
8.1. Применение технологии плазменного травления для формирования наноразмерных элементов. . . . .	293
8.2. Современные методы формирования функциональных слоев нано- структур с применением низкотемпературной газовой плазмы. . . . .	317
8.3. Перспективы развития плазменной технологии . . . . .	327
Авторы . . . . .	329
Литература . . . . .	330
<b>Глава 9. Наноструктурированные оксиды металлов в техно- логии устройств функциональной электроники . . . . .</b>	<b>332</b>
9.1. Пористый анодный оксид алюминия . . . . .	334
9.2. Наноструктурированный оксид титана . . . . .	342
9.3. Нанокристаллический оксид цинка . . . . .	350
Авторы . . . . .	355
Литература . . . . .	355
<b>Глава 10. Функциональные некристаллические покрытия для микро- и нанoeлектроники . . . . .</b>	<b>361</b>
10.1. Технологии получения некристаллических материалов. . . . .	362
10.2. Импульсное осаждение дуговой электроэрозсионной плазмы . . . . .	365
10.3. Морфология поверхности . . . . .	369
10.4. Применение функциональных некристаллических покрытий . . . . .	377
Литература . . . . .	404
<b>Глава 11. Лазерный метод создания биосовместимых композиционных наноматериалов с углеродными нанотрубками . . . . .</b>	<b>407</b>
11.1. Технология получения биосовместимых объемных композиционных наноматериалов с углеродными нанотрубками. . . . .	409
11.2. Механические свойства композиционных наноматериалов. . . . .	415
11.3. Электропроводящие свойства композиционных наноматериалов . . . . .	423
11.4. Лазерная сварка композиционных наноматериалов . . . . .	426
11.5. Биосовместимость композиционных наноматериалов. Рост клеточных структур на матриксе из композиционных наноматериалов . . . . .	431
Авторы . . . . .	443
Литература . . . . .	444

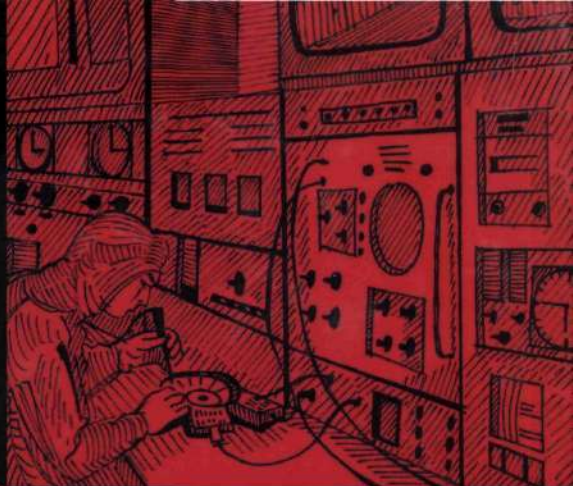
<b>Глава 12. Микро- и наноэлектромеханические системы и устройства</b> . . . . .	449
12.1. Разработка преобразователей линейного ускорения . . . . .	452
12.2. Разработка преобразователей угловой скорости . . . . .	468
12.3. Разработка микромеханического зеркала на основе балочного микроактюатора . . . . .	478
Литература . . . . .	490
<b>Глава 13. Элементы наноэлектроники на основе высокотемпературного сверхпроводника состава <math>(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}</math></b> . . . . .	495
13.1. Свойства сверхпроводника состава $(\text{Bi,Pb})\text{SrCaCuO}$ . Внутренний эффект Джозефсона в сверхпроводниках на основе висмута . . . . .	496
13.2. Технология получения тонких слоев высокотемпературного сверхпроводника состава $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ . . . . .	502
13.3. Технология изготовления и свойства магниточувствительных структур . . . . .	513
13.4. Приемники электромагнитного излучения инфракрасной области спектра . . . . .	522
13.5. Перспективные электронные приборы . . . . .	526
Литература . . . . .	528
<b>Глава 14. Магниторезистивные структуры в устройствах наноэлектроники и микросистемной техники</b> . . . . .	540
14.1. Физические процессы в магниторезистивных структурах . . . . .	542
14.2. Материалы, методы формирования и электрофизические свойства магниторезистивных структур . . . . .	566
14.3. Применение магниторезистивных структур . . . . .	579
Авторы . . . . .	594
Литература . . . . .	595
<b>Глава 15. Кремниевые биполярные гетероструктуры и проектирование СВЧ интегральных схем на их основе</b> . . . . .	601
15.1. СВЧ гетеропереходная полупроводниковая элементная база . . . . .	602
15.2. Состояние и перспективы технологии кремниевых гетеропереходных биполярных транзисторов для СВЧ-применений . . . . .	611
15.3. Особенности проектирования СВЧ интегральных устройств с использованием гетеропереходных транзисторов . . . . .	616
15.4. Защита интегральных SiGe БиКМОП-микросхем от электростатического напряжения . . . . .	627
15.5. Проектирование СМЛ масштабируемой библиотеки . . . . .	637
15.6. Примеры проектирования СВЧ ИМС на гетеропереходных биполярных транзисторах с SiGe-базой для сверхскоростных систем передачи данных . . . . .	648
Литература . . . . .	677

мир

# электроники

НАНОТЕХНОЛОГИИ  
В ЭЛЕКТРОНИКЕ  
ВЫПУСК 2

Под редакцией  
Ю.А. ЧАПЛЫГИНА



В КНИГЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ  
РАБОТЫ ВЕДУЩИХ УЧЕНЫХ  
НАЦИОНАЛЬНОГО  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА МИЭТ

НОВЕЙШИЕ ДОСТИЖЕНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ  
ВНЕДРЕНИЯ  
НАНОТЕХНОЛОГИЙ  
В ЭЛЕКТРОНИКУ



ТЕХНОСФЕРА

ISBN 978-5-94836-353-0



9 785948 363530

