

Министерство образования и науки Российской Федерации  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

В.П. ДРАГУНОВ, И.Г. НЕИЗВЕСТНЫЙ

# НАНОСТРУКТУРЫ ФИЗИКА, ТЕХНОЛОГИЯ, ПРИМЕНЕНИЕ

Утверждено  
Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия

2-е издание

НОВОСИБИРСК  
2010

УДК 539.22  
Д 721

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, профессор *О.В. Кибис*,  
д-р физ.-мат. наук, профессор *В.Н. Шумский*

Работа подготовлена на кафедре ПП и МЭ

**Драгунов В.П.**

Д 721 Наноструктуры : физика, технология, применение : учеб. пособие / В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный. – 2-е изд. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 356 с.

ISBN 978-5-7782-1288-6

Рассматриваются вопросы, связанные с новыми тенденциями развития кремниевой наноэлектроники, увеличением чувствительности нанопроволочных химических и биологических сенсоров, созданием ПЗС-фотоматриц высокой плотности и чувствительности и их применение в цифровой фото- и видеоаппаратуре.

Приведены основные сведения об особенностях энергетического спектра и транспорта носителей заряда в одномерных системах (квантовых проводниках) и углеродных нанотрубках.

Кратко изложены термины, принципы, достижения и перспективы в таких быстро развивающихся областях, как магнитоэлектроника (спинтроника) и фотонные кристаллы.

Пособие предназначено для студентов старших курсов и аспирантов, специализирующихся в области полупроводниковой нанотехнологии, микро- и наноэлектроники.

УДК 539.22

ISBN 978-5-7782-1288-6

© Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., 2010  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Глава 1. Новая парадигма в тенденциях развития кремниевой нано-электроники</b> .....	7
Введение .....	7
1.1. Увеличение быстродействия за счёт уменьшения длины канала .....	9
1.2. Использование напряжённого кремния в МДП-транзисторах и КМОП структурах .....	14
1.2.1. Механические напряжения в полупроводниках .....	15
1.2.2. Способы введения напряжений в область канала МДПТ .	23
1.2.2.1. Деформация, вводимая подложкой .....	23
1.2.2.2. Деформации, вводимые в область канала транзистора с помощью технологических процессов .....	25
1.2.3. Влияние относительной ориентации поверхности подложки направления тянущего поля в канале и направления напряжения .....	30
1.3. Проблема металла при формировании затвора .....	32
Заключение .....	37

Список литературы .....	40
<b>Глава 2. Фотоприемники на основе структур металл–диэлектрик–полупроводник – приборов с зарядовой связью .....</b>	<b>43</b>
2.1. Физические основы работы ПЗС-структур .....	44
2.1.1. Неравновесное обеднение полупроводника в МДП структуре .....	44
2.1.2. Устройство и принцип работы ПЗС .....	47
2.2. Обработка сигнала на многоэлементном ПЗС (Линейка, Матрица) .....	59
2.3. Шумы приборов с зарядовой связью .....	63
2.4. Приёмники излучения на основе приборов с зарядовой инжекцией .....	65
2.5. Получение цветного изображения .....	71
2.6. Приборы, отображающие оптическую информацию .....	78
2.6.1. Электролюминесцентные дисплеи .....	79
2.6.2. Материалы для цветных дисплеев .....	82
2.6.3. Конструкция многоцветных дисплеев .....	84
2.6.4. Жидкокристаллические дисплеи .....	86
2.6.5. Плазменные дисплеи .....	91
Список литературы .....	
<b>Глава 3. Полупроводниковые нанопроволочные сенсоры .....</b>	<b>94</b>
3.1. Общие проблемы химических и биологических сенсоров .....	95
3.2. Физические принципы работы химических и биосенсоров .....	97
3.3. Методы получения нанопроволок .....	102
3.4. Химические нанопроволочные сенсоры .....	106
3.5. Нанобиосенсоры .....	108
3.6. Снабжение энергией автономных наносенсорных беспроводных приборов и «нанобиороботов» .....	119
3.7. Заключение .....	123
Список литературы .....	
<b>Глава 4. Особенности транспорта электронов в 1D-системах .....</b>	<b>127</b>
4.1. Кондактанс идеального квантового проводника в баллистическом режиме .....	131
4.2. Баллистическая проводимость квантовых проводов при конечных температурах .....	140

4.3. Квантовая проводимость с учетом разогрева носителей заряда в продольном электрическом поле .....	142
4.4. Интерференционный транзистор на основе одномодового КП .....	145
4.5. Особенности измерения кондактанса КП в баллистическом режиме многоконтактным методом .....	149
4.6. Электропроводность квантовых проволок в диффузионном режиме .....	154
4.7. Влияние флуктуаций толщины полупроводниковой квантовой проволоки на ее статическую электропроводность .....	156
4.8. Влияние магнитного поля на проводимость КП в диффузионном режиме .....	161
4.9. Плотность состояний в квантовом проводе с уширенными энергетическими уровнями .....	170
Список литературы .....	176
<b>Глава 5. Нанотрубки</b> .....	181
5.1. Структура углеродных нанотрубок .....	183
5.2. Электронные свойства углеродных нанотрубок .....	192
5.3. Механические свойства углеродных нанотрубок .....	203
5.4. Фононный спектр углеродных нанотрубок .....	220
Список литературы .....	225
<b>Глава 6. Магнитоэлектроника</b> .....	231
6.1. Гигантское магнетосопротивление .....	233
6.1.1. Гигантское магнетосопротивление в мультислойных структурах первого типа .....	238
6.1.2. Гигантское магнетосопротивление в мультислоях второго и третьего типа .....	247
6.1.3. Магнитные туннельные структуры .....	253
6.2. Колоссальное магнетосопротивление в магнитных полупроводниках .....	257
6.3. Гигантский магнитоэлектрический эффект в мультиферроиках .....	262
6.4. Основные направления развития магнитоэлектроники .....	271
Список литературы .....	277
<b>Глава 7. Фотонные кристаллы</b> .....	283
7.1. Общие положения .....	283
7.2. Одномерные фотонные кристаллы .....	286

7.3. Одномерные квазипериодические фотонные кристаллы .....	290
7.4. Особенности плотности состояний одномерного разупорядоченного фотонного кристалла .....	296
7.5. Фотонно-кристаллические свойства магнитогиротропных сред .....	306
7.6. Двух- и трехмерные фотонные кристаллы .....	313
7.7. Фотонные кристаллы на основе опала .....	317
7.8. Оптические свойства нанокompозитов на основе пористого кремния .....	324
7.8.1. Формирование пористого кремния .....	325
7.8.2. Двухлучепреломление и дисперсия оптических параметров ПК .....	327
7.8.3. Двухлучепреломление окисленного ПК .....	332
7.8.4. Одномерные фотонно-кристаллические структуры на основе ПК .....	334
7.8.5. Двух- и трехмерные фотонно-кристаллические структуры на основе ПК .....	338
Список литературы .....	347