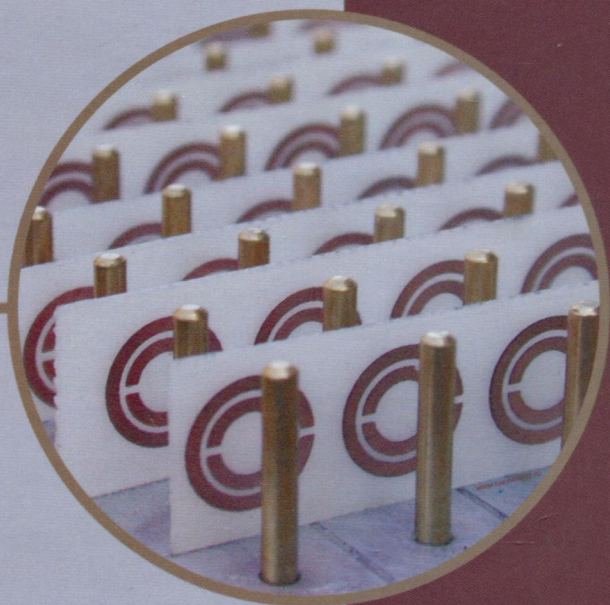


# **МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА В СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ**



**Ю.В. Гуляев  
А.С. Бугаев  
Р.П. Быстров  
С.А. Никитов  
В.А. Черепенин**

УДК 621.396.967  
ББК 32.95  
М 59

Отзыв  
*академика Н.А. Кузнецова*

**Авторы:**  
Ю.В. Гуляев, А.С. Бугаев, Р.П. Быстров,  
С.А. Никитов, В.А. Черепенин



**Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
по проекту № 13-07-07001.  
*Не подлежит продаже***

**М 59** Микро- и наноэлектроника в системах радиолокации. Монография. –  
М.: Радиотехника, 2013. – 480 с.: ил.

ISBN 978-5-88070-377-7

В монографии рассмотрены вопросы применения микро- и наноматериалов в радиолокационных системах и их элементной базе. Показано нано- и микроэлектронное исполнение активных фазированных антенных решеток, приемопередающих систем и других узлов РЛС. Представлено современное исполнение на ПАВ резонаторов, фильтров, дисперсионных линий задержки, устройств дистанционной радиочастотной идентификации объектов и других СВЧ-компонентов. Освещены вопросы применения новых материалов, МЭМС- и НЭМС-устройств, принципов нано- и радиофотоники в системах радиолокации. Определены пути создания радиолокационных систем нового поколения.

*Для научных работников, инженеров, преподавателей, аспирантов и студентов технических вузов.*

**УДК 621.396.967  
ББК 32.95**

ISBN 978-5-88070-377-7

© Авторы, 2013  
© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2013

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ОТЗЫВ О МОНОГРАФИИ АКАДЕМИКА РАН Н. А. КУЗНЕЦОВА .....</b> | <b>7</b>  |
| <b>ОТ АВТОРОВ.....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>  | <b>11</b> |
| <i>Литература .....</i>                                       | <i>17</i> |

## **ЧАСТЬ ПЕРВАЯ**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Материалы, технологии и элементная база микро-<br/>и нанoeлектроники .....</b> | <b>19</b> |
|---|-----------|

### **ГЛАВА 1**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Перспективные материалы и компоненты элементной базы.....</b>  | <b>21</b> |
| 1.1. Компоненты твердотельной СВЧ-электроники .....   | 22        |
| 1.1.1. Особенности твердотельных СВЧ-приборов .....   | 22        |
| 1.1.2. Основные электрофизические параметры полупроводниковых материалов<br>для СВЧ-приборов.....                           | 24        |
| 1.1.3. Алмаз для электронных приборов СВЧ-диапазона .....   | 25        |
| 1.1.4. Физическая сущность гетероструктур и результаты исследований их свойств.....   | 7         |
| 1.2. Композиционные и нанокompозиционные материалы .....  | 36        |
| 1.2.1. Структура и свойства композиционных материалов .....   | 37        |
| 1.2.2. Особенности нанокompозиционных материалов .....  | 38        |
| 1.2.3. Свойства многофункциональных нанокompозиционных материалов .....   | 39        |
| 1.2.4. Исследование нанокompозитов на основе бинарных соединений .....  | 40        |
| 1.2.5. Спектральные свойства композитов на основе углеродных нанотрубок и<br>полипропилена .....                            | 42        |
| 1.2.6. Магнитные кристаллы и их природа .....   | 47        |
| 1.2.7. Нанокompозиционные материалы для антенных систем .....   | 51        |
| 1.3. Конструкционные наноматериалы .....  | 52        |
| 1.3.1. Наноматериалы для электрически управляемых устройств .....   | 54        |
| 1.3.2. Наноматериалы для теплоотводов .....   | 56        |
| 1.3.3. Наноматериалы для радиопрозрачных устройств .....  | 57        |
| 1.3.4. Микро- и наноматериалы для размеростабильных опорных структур<br>в условиях меняющихся температуры и влажности ..... | 57        |
| 1.3.5. Особопрочные радиационнотстойкие пеноматериалы с низкими потерями<br>в СВЧ-диапазоне .....                           | 59        |
| 1.3.6. Микро- и наноматериалы для высокочастотных печатных плат .....   | 60        |

## Микро- и наноэлектроника в системах радиолокации

|   |     |
|---|-----|
| 1.4. Микро- и наноматериалы для устройств на ПАВ .....          | 64  |
| 1.4.1. Подложки устройств на ПАВ .....                          | 64  |
| 1.4.2. Основные параметры материалов для устройств на ПАВ ..... | 66  |
| 1.4.3. Монокристаллические подложки .....                       | 81  |
| 1.4.4. Многослойные подложки .....                              | 94  |
| 1.4.5. Температурно-стабильные устройства на ПАВ .....          | 102 |
| <i>Литература</i> .....   | 105 |

### ГЛАВА 2

#### Технологии производства микро- и наноматериалов.....114

|  |     |
|--|-----|
| 2.1. Особенности технологий производства микро- и наноматериалов.....                  | 114 |
| 2.2. Технологии производства микро- и нанoeлектромеханических систем .....             | 115 |
| 2.2.1. Чувствительные элементы .....   | 116 |
| 2.2.2. Структуры и устройства на основе технологий МЭМС и НЭМС .....                   | 118 |
| 2.3. Технология производства нанoуглеродных структур.....                              | 120 |
| 2.3.1. Наноформы углерода .....  | 120 |
| 2.3.2. Структура и свойства нанотрубок .....   | 122 |
| 2.3.3. Фуллерены и фуллереноподобные структуры на основе нанoуглеродных<br>трубок..... | 123 |
| 2.3.4. Особенности технологии производства и применения нанотрубок .....               | 128 |
| 2.4. Графены .....   | 131 |
| 2.4.1. Структура и свойства графенов .....   | 131 |
| 2.4.2. Проблемы технологии производства графенов .....                                 | 132 |
| 2.4.3. Возможность применения графенов в радиолокации .....                            | 133 |
| 2.5. Технологии производства магнитных и магниторезистивных материалов .....           | 134 |
| 2.5.1. Наноразмерные магнитные структуры.....  | 135 |
| 2.5.2. Магнитные и магниторезистивные свойства нанопроволок .....                      | 141 |
| 2.5.3. Технологические особенности нанопроволок .....                                  | 143 |
| 2.6. Технология производства гетероструктур.....                                       | 144 |
| <i>Литература</i> .....  | 151 |

### ГЛАВА 3

#### Элементная база микро- и наноэлектроники.....157

|   |     |
|---|-----|
| 3.1. Микросистемная техника – новые возможности .....   | 157 |
| 3.1.1. Требования к основным параметрам систем радиолокации<br>на основе микросистемной техники ..... | 157 |
| 3.1.2. Основные позиции программы развития МЭМС .....   | 159 |
| 3.1.3. МЭМС радиочастотного диапазона.....  | 160 |
| 3.2. Приборы для систем радиолокации на основе<br>микро- и нанoeлектронных материалов .....           | 165 |
| 3.2.1. Химические датчики на базе НЭМС.....   | 165 |
| 3.2.2. Нанoeлектромеханический преобразователь с подвешенной<br>над подложкой углеродной трубкой..... | 168 |
| 3.3. СВЧ-элементы на основе микроалмазных материалов .....  | 170 |
| 3.4. Интегральные микросхемы .....  | 184 |
| 3.4.1. Современный уровень проектирования микросхем.....  | 185 |
| 3.4.2. Сегнетоэлектрики в устройствах СВЧ-диапазона .....   | 185 |
| <i>Литература</i> .....   | 197 |

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### ЧАСТЬ ВТОРАЯ

#### Применение микро- и наноэлектроники в системах радиолокации..... 203

#### ГЛАВА 4

##### Устройства на ПАВ для систем радиолокации.....205

- 4.1. Тенденции развития акустоэлектроники СВЧ ..... 205
  - 4.1.1. Частотно-задающие и частотно-селективные акустоэлектронные устройства в коротковолновой части СВЧ-диапазона .....205
  - 4.1.2. Принципы работы акустоэлектронных СВЧ-резонаторов и фильтров на ОАВ .....207
- 4.2. Устройства на ПАВ для формирования и сжатия сложных сигналов ..... 213
  - 4.2.1. Устройства на ПАВ для корреляционной обработки сложных сигналов.....214
  - 4.2.2. Устройства на ПАВ для формирования и сжатия сигналов с дисперсионными преобразователями .....222
  - 4.2.3. Дисперсионные акустоэлектронные линии задержки с отражательными структурами .....231
- 4.3. Миниатюризация и функциональная интеграция устройств на ПАВ ..... 246
  - 4.3.1. Особенности миниатюризации: варианты технических решений .....247
  - 4.3.2. Типы корпусов и технологии упаковки фильтров на ПАВ. Примеры выпускаемых миниатюрных фильтров .....248
  - 4.3.3. Конструкция и примеры фильтров на упругих граничных ПАВ .....254
  - 4.3.4. Интеграция устройств на ПАВ: примеры реализации .....255
  - 4.3.5. Модульная архитектура построения и принципы интеграции устройств на ПАВ .....259

*Литература* ..... 263

#### ГЛАВА 5

##### Антенны и блоки систем радиолокации на основе радиофотоники ..... 268

- 5.1. Применение устройств нанофотоники в радиолокации ..... 269
  - 5.1.1. Антенны РЛС.....269
  - 5.1.2. Передатчик, приемник, индикатор и другие блоки РЛС .....278
- 5.2. Применение радиофотоники в РЛС ..... 302

*Литература* ..... 310

#### ГЛАВА 6

##### Микро- и наноэлектронные функциональные узлы для РЛС.....314

- 6.1. Схемы функциональных систем РЛС ..... 315
- 6.2. Микроэлектронное исполнение приемопередающих систем РЛС ..... 318
  - 6.2.1. МИС на GaN – усилители приемопередающих модулей.....319
  - 6.2.2. GaN МИС – переключатели ПИМ .....319
- 6.3. Микроэлектронное исполнение АФАР .....324
  - 6.3.1. АФАР с использованием МЭМС .....324
  - 6.3.2. Антенные МЭМС с управляемыми линиями задержки и их компоненты .....326
  - 6.3.3. МЭМС-генераторы.....327
  - 6.3.4. Увеличение направленности наноантенн РЛС путем применения композиционных материалов и нанотехнологий.....328
  - 6.3.5. Наноантенна на базе резонаторно-щелевого сферического излучателя.....341
  - 6.3.6. Активные ФАР на GaAs.....345

## Микро- и наноэлектроника в системах радиолокации

|  |            |
|--|------------|
| 6.4. Микросистемные устройства в РЛС.....  | 346        |
| 6.4.1. Микросистемная техника .....  | 348        |
| 6.4.2. Теплопроводящие наноматериалы .....   | 352        |
| 6.4.3. Радиопоглощающие материалы .....  | 352        |
| 6.4.4. Монолитные интегральные схемы.....  | 355        |
| <i>Литература</i> .....  | 364        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....  | <b>367</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....  | <b>369</b> |
| Приложение 1. Общие свойства материалов и приборов<br>микро- и наноэлектроники и перспективы их применения .....                                   | 371        |
| Приложение 2. Твердотельные СВЧ-приборы .....  | 388        |
| Приложение 3. Микро- и наноэлектромеханические структуры.....  | 395        |
| Приложение 4. Углеродные нанотрубки .....  | 417        |
| Приложение 5. Графены.....   | 434        |
| Приложение 6. Наноленты и нанопроволоки .....  | 452        |
| Приложение 7. Физические свойства некоторых монокристаллов .....   | 464        |
| Приложение 8. Материальные константы некоторых монокристаллов .....  | 465        |
| Приложение 9. Основные параметры некоторых материалов, применяемых<br>для подложек устройств на ПАВ.....   | 467        |
| Приложение 10. Характеристики некоторых срезов монокристалла кварца .....  | 469        |
| Приложение 11. Характеристики псевдоповерхностных акустических волн,<br>распространяющихся в подложках устройств на ПАВ<br>с пленками стекла ..... | 470        |
| Приложение 12. Характеристики подложек с пьезоэлектрическими пленка-<br>ми в устройствах на ПАВ.....   | 470        |
| Приложение 13. Значения материальных констант некоторых многослойных<br>подложек устройств на ПАВ .....  | 471        |
| Приложение 14. Характеристики некоторых методов температурной стаби-<br>лизации .....  | 472        |
| <b>MICRO AND NANOELECTRONICS IN SYSTEMS RADAR-LOCATIONS ....</b>   | <b>473</b> |
| Table Of Contents .....  | 475        |