



В. И. Смирнов

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

В. И. Смирнов

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
НАНОТЕХНОЛОГИЙ
И НАНОМАТЕРИАЛЫ**

Учебное пособие

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2023

УДК 620.22
ББК 30.37
С50

Рецензенты:

Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН
(директор д-р техн. наук, профессор *В. А. Сергеев*);
заведующий кафедрой приборостроения
Пензенского государственного университета
д-р техн. наук, профессор *В. А. Васильев*

Смирнов, В. И.
С50 Физические основы нанотехнологий и наноматериалы : учебное пособие /
В. И. Смирнов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 232 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-1246-9

Изложены физические основы нанотехнологий, а также свойства наноматериалов, используемых в электронной промышленности и энергетике. Особое внимание уделено технологическим аспектам получения наноматериалов, их свойствам и конструктивным особенностям, позволяющим создавать новые элементы наноэлектроники, нанопотоники и микросистемной техники.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств», 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника».

УДК 620.22
ББК 30.37

ISBN 978-5-9729-1246-9

© Смирнов В. И., 2023
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ	6
1.1. История развития и основные направления нанотехнологий	6
1.2. Квантово-размерные наноструктуры	26
1.2.1. Квантово-размерные эффекты в наноструктурах	26
1.2.2. Способы формирования квантово-размерных структур	35
1.3. Инструментарий нанотехнологий	50
1.3.1. История создания сканирующего туннельного микроскопа	50
1.3.2. Сканирующая туннельная микроскопия	54
1.3.3. Атомно-силовая микроскопия	65
1.3.4. Магнито-силовая микроскопия	71
1.3.5. Электросиловая микроскопия	74
1.3.6. Ближнепольная сканирующая оптическая микроскопия	77
1.3.7. Сканирующая зондовая литография	82
Контрольные вопросы	89
2. НАНОМАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ	91
2.1. Классификация наноматериалов и их особые свойства	91
2.2. Углеродные наноматериалы	96
2.2.1. Аллотропные модификации углерода	96
2.2.2. Фуллерены	99
2.2.3. Углеродные нанотрубки	115
2.2.4. Графен	146
2.2.5. Производные графена	160
2.2.6. Графеноподобные наноматериалы	171
2.3. Аморфные и нанокристаллические материалы	179
2.4. Композиционные наноматериалы	188
2.5. Пористый кремний	201
2.6. Технологии получения наноматериалов	210
Контрольные вопросы	227
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	228
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	229