

УДК 539.23:620.1(075.8)
А 724

Рецензенты:

канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории нанотехнологий
и наноматериалов ИФП СО РАН *А. И. Иванов*

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой ППИМЭ НГТУ
Д. И. Остертак

Работа подготовлена на кафедре
полупроводниковых приборов и микроэлектроники
для студентов старших курсов факультета радиотехники
и электроники (направления 28.04.01 «Нанотехнологии
и микросистемная техника» и 11.04.04 «Электроника
и наноэлектроника»)

Антонова И. В.

А 724 Графен и другие двумерные материалы: свойства и методы получения:
учебное пособие / И. В. Антонова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. –
90 с.

ISBN 978-5-7782-5017-8

Целью курса является формирование знаний о физико-химических закономерностях и технологиях получения современных тонкопленочных (монослойных) наноматериалов, их свойствах и новых явлениях, обусловленных предельно малой толщиной и влиянием подложек и соседних монослоев; об экспериментальных методиках исследования свойств монослойных материалов; о физических принципах создания нового поколения быстродействующих приборов и устройств на основе монослойных материалов, конструкциях и технологиях создания приборных структур на их основе, базовых физических принципах их функционирования, характеристиках и особенностях применения.

Пособие предназначено для студентов, магистрантов и аспирантов, специализирующихся в области наноматериалов, нанотехнологий и микросистемной техники. Может быть рекомендовано студентам других специальностей, научным работникам и инженерам, желающим самостоятельно изучать современные 2D-наноматериалы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания, код проекта FWGW-2022-0009, тема проекта: «Исследование физических свойств новых 2D- и 3D-наноструктур и материалов для практических применений».

УДК 539.23:620.1(075.8)

ISBN 978-5-7782-5017-8

© Антонова И. В., 2023
© Новосибирский государственный
технический университет, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение. Наноматериалы и нанотехнологии	3
1.1. Ван-дер-ваальсовы гетероструктуры	4
1.2. Графен, история открытия графена и его основные свойства	6
2. Свойства графена	10
2.1. Кристаллическая решетка графена	10
2.2. Зонная структура графена	11
2.3. Зонная структура мультиграфена	14
2.4. Парадокс Клейна (туннелирование электрона через барьер)	15
2.5. Оптические свойства графена	15
2.6. Теплопроводность графена	18
2.7. Механические свойства графена	19
2.8. Высокая подвижность носителей заряда в графене	20
2.9. Электрические свойства графена	21
2.10. Легирование графена и открытие в графене запрещенной зоны	22
3. Методы получения графена	26
3.1. Механическое отслоение графена от графита	26
3.2. Электростатическое отслоение графена	27
3.3. Химические методы получения графена	29
3.4. Синтез графена «снизу вверх»	30
3.5. CVD-рост графена	30
3.6. Эпитаксия на SiC, взаимодействие выращенных слоев с подложкой	31
3.7. Сравнение свойств графена, полученного разными методами	31
4. Выращивание графена и мультиграфена методом CVD	33
4.1. Выбор и подготовка металлической подложки	33
4.2. Рост на медных подложках: примеры роста и сравнение результатов	37
4.3. Рост при температурах выше температуры плавления медной подложки	42
4.4. Рост монокристаллов графена на подложках Ge/Si	42
4.5. Эпитаксиальный рост монокристаллического графена на меди	44
4.6. Перенос графена на изолирующие подложки	44
4.7. Сравнение электрических свойств перенесенных слоев	48
4.8. Перенос графена большой площади на гибкие подложки	50

5. Функционализация графена	52
5.1. Ковалентная функционализация графена.....	52
5.1.1. Оксид графена.....	52
5.1.2. Гидрированный графен.....	57
5.1.3. Фторированный графен: свойства и получение.....	61
5.2. Нековалентная функционализация графена.....	68
6. Современные монослойные материалы	69
6.1. 2D-материалы для ван-дер-ваальсовых гетероструктур.....	69
6.2. Гексагональный нитрид бора.....	70
6.3. Многослойные гетероструктуры графен / h-BN.....	73
6.4. Получение слоев h-BN.....	73
6.5. Рост латеральных и вертикальных гетероструктур из h-BN и графена.....	75
6.6. Дихалькогениды переходных металлов.....	77
6.7. Получение слоев MoS ₂	79
6.8. Графеноподобные материалы.....	82
Заключение.....	85
Библиографический список.....	86