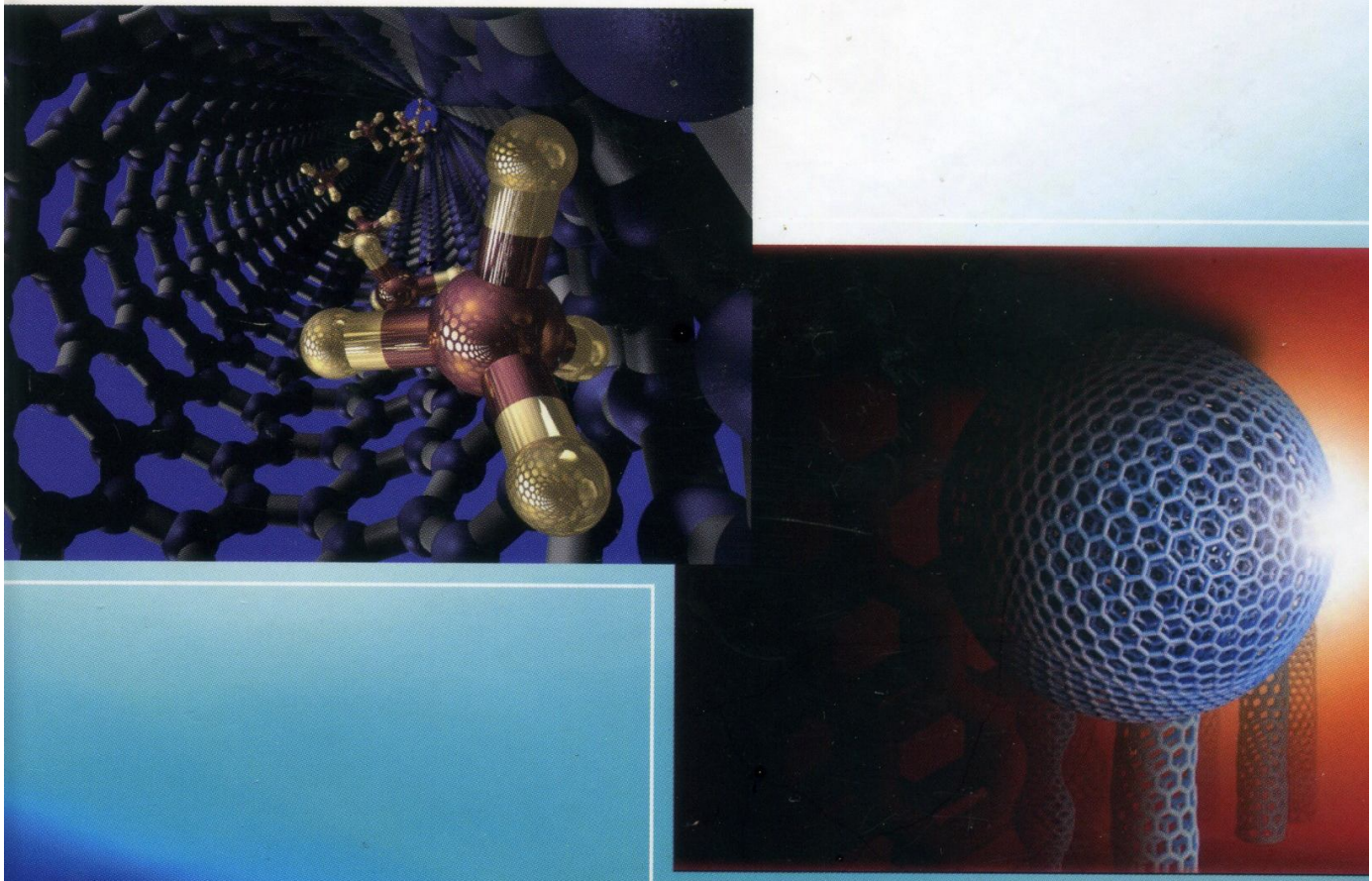
С.І. Мудрий, І.І. Штаблавий

Фізика кластерів і наносистем



Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

С. І. МУДРИЙ, І. І. ШТАБЛАВИЙ

ФІЗИКА
КЛАСТЕРІВ І НАНОСИСТЕМ

Навчальний посібник

Львів
ЛНУ імені Івана Франка
2017

УДК [539.1/.2:620.3](075.8)
ББК В36я73+В38я73
М 89

Рецензенти:
д-р фіз.-мат. наук, проф. *Р. Д. Венгренович*
(Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича)

д-р хім. наук, проф. *В. П. Казіміров*
(Київський національний університет імені Тараса Шевченка)

д-р техн. наук, проф. *З. А. Дурягіна*
(Національний університет "Львівська політехніка")

Рекомендовано
до друку Вченою радою Львівського національного університету
імені Івана Франка
Протокол № 29/12 від 28.12.2016 р.

Мудрий С. І.

М 89 Фізика кластерів і наносистем : навч. посібник / С. І. Мудрий, І. І. Штаблавий. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2017. – 356 с.
ISBN 978-617-10-0352-1.

У посібнику висвітлені основні питання фізики кластерів і кластерних систем. Описано різні типи кластерів, їхню структуру, фізичні властивості та методи отримання. Детально розглянуто структурні форми з різним ступенем упорядкованості, у тім числі – фрактали. Значну увагу звернуто на вуглецеві кластери – фулерени та нанотрубки. Проаналізовані квантово-розмірні ефекти та гетероструктури, створені на квантових потенціальних ямах, квантових дротах та квантових точках, а також сфери практичного застосування наносистем та сучасні методи їхнього дослідження.

Посібник рекомендований студентам фізичних спеціальностей університетів, а також фахівцям, які досліджують нанооб'єкти і нанотехнології.

УДК [539.1/.2:620.3](075.8)
ББК В36я73+В38я73

ISBN 978-617-10-0352-1

© Мудрий С. І., Штаблавий І. І., 2017
© Львівський національний університет
імені Івана Франка, 2017

Зміст

Вступ 7
Розділ 1. Кластери 11
1.1. Класифікація кластерів 12
1.1.1. Молекулярні кластери 13
1.1.2. Безлігандні кластери 14
1.1.3. Колоїдні кластери 15
1.1.4. Металеві кластери 20
1.1.5. Кластери інертних газів 21
1.1.6. Карбонові кластери 23
1.1.7. Термодинаміка кластерів 27
Контрольні запитання 32

Розділ 2. Кластерна структура невпорядкованих систем 33
2.1. Загальна характеристика структурного безладу 33
2.2. Методи дослідження безладу 36
2.2.1. Дифракція нейтронів 41
2.2.2. Дифракція рентгенівських променів 44
2.2.3. Дифракція електронів 48
2.2.4. Малокутова дифракція 50
2.3. Основні параметри кластерної будови 57
2.4. Кластерна структура води 61
Контрольні запитання 66

Розділ 3. Наночастинки 67
3.1. Фулерени 68
3.1.1. Фізико-хімічні властивості фулеренів 70
3.1.2. Фулерени заміщення 71
3.1.3. Ендоедральні фулерени 72
3.1.4. Екзоедральні фулерени 73
3.1.5. Механізм утворення фулеренів 74
3.1. 6. Утворення фулеренів і самоорганізація 76
3.1.7. Методи отримання фулеренів 78
Контрольні запитання 82

Розділ 4. Кластерні системи 83
4.1. Фрактальні наносистеми 83
4.1.1. Поняття про фрактали і фрактальні структури 83
4.1.2. Теплоємність фрактальних структур 88
4.1.3. Кінетика утворення фракталів 91
4.1.4. Аерогелі 96
4.2. Методи дослідження фрактальних структур 101
Контрольні запитання 106

Розділ 5. Вуглецеві нанотрубки 107
5.1. Структура нанотрубок 107
5.2. Фізичні властивості нанотрубок 114
5.2.1. Електропровідність 114
5.2.2. Емісійні властивості 121
5.2.3. Магнітні властивості 125
5.2.4. Механічні властивості 125
5.3. Фізичні основи синтезу нанотрубок 127
5.3.1. Електродуговий метод 127
5.3.2. Метод лазерного випаровування 130
5.3.3. Каталітичні методи 131
5.4. Очищення і розкриття нанотрубок 134
5.5. Нанотрубки, заповнені домішковими атомами, молекулами і наночастинками 136
5.6. Невуглецеві нанотрубки 141
5.7. Практичне застосування нанотрубок 143
5.8. Інші вуглецеві кластери 151
Контрольні запитання 156

Розділ 6. Нанокластерні системи 157
6.1. Фулерити 157
6.2. Фулериди 162
6.3. Об'ємні наноструктуровані матеріали 167
6.3.1. Невпорядковані твердотільні наноматеріали 167
6.3.2. Багатошарові наноструктурні системи 176
6.4. Електричні властивості наносистем 177
6.5. Металічні нанокластери в оптичних склах 180
6.6. Наноструктуровані системи, отримані методом пластичної деформації 181
6.7. Наноструктуровані кристали 186
6.8. Наноструктури в цеолітах 187
6.9. Кристали з металевих наночастинок 188
6.10. Колоїдні наносистеми 189
6.11. Матричні і супрамолекулярні наносистеми 193
6.12. Біологічні наносистеми 197
6.13. Міцели 201
Контрольні запитання 204

Розділ 7. Оптичні властивості наносистем 205
7.1. Наносистеми з металевих кластерів 206
7.2. Наносистеми з напівпровідникових кластерів 209
7.3. Фотонні нанокристали 212
Контрольні запитання 214

Розділ 8. Магнетизм наносистем 215
8.1. Особливості магнітних властивостей наносистем 215
8.2. Суперпарамагнетизм 218
8.3. Квантове магнітне тунелювання 224
8.4. Магнітні властивості наночастинок і створення нових комп'ютерів 228
8.5. Кластери і наносистеми у магнітному полі 230
8.6. Гігантський магнітоопір 233
8.6.1. Механізм виникнення гігантського магнітоопору 233
8.6.2. Гігантський магнітоопір у наноструктурах 235
8.7. Магнітні фазові переходи 242
8.8. Інші магнітні характеристики наносистем 246
Контрольні запитання 252

Розділ 9. Методи дослідження наноматеріалів 253
9.1. Сканувальна зондова мікроскопія 254
9.1.1. Сканувальна тунельна мікроскопія 255
9.1.2. Атомна силова мікроскопія 257
9.1.3. Магніто-силова мікроскопія 259
9.2. Спектроскопічні методи 261
9.2.1. Рентгенівська спектроскопія 261
9.2.2. Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія 262
9.2.3. Месбауерівська спектроскопія 263
9.2.4. Інфрачервона і раманівська спектроскопії 264
Контрольні запитання 267

Розділ 10. Квантово-розмірні структури 268
10.1. Загальна характеристика низькорозмірних систем 268
10.2. Густина станів і розмірність об'єкта 269
10.3. Потенціальні ями 271
10.4. Магнетизм низькорозмірних систем 273
10.5. Квантовий сфект Холла 277
10.6. Квантові дроти 283
10.7. Квантові точки 288
10.8. Надгратки і гетероструктури 290
10.9. Фонони у низькорозмірних структурах 302
10.10. Практичне застосування квантово-розмірних структур та методи їхнього отримання 305
10.10.1. Фізичні основи практичного використання квантово-розмірних систем 305
10.10.2. Основні пристрої наноелектроніки 310
10.10.3. Лазери на основі квантових ям і квантових точок 316

10.10.4. Мікро- і наноелектромеханічні системи..... 323
10.10.5. Методи отримання наноструктур..... 336
Контрольні запитання..... 352

Список використаної та рекомендованої літератури..... 353
Предметний покажчик..... 354