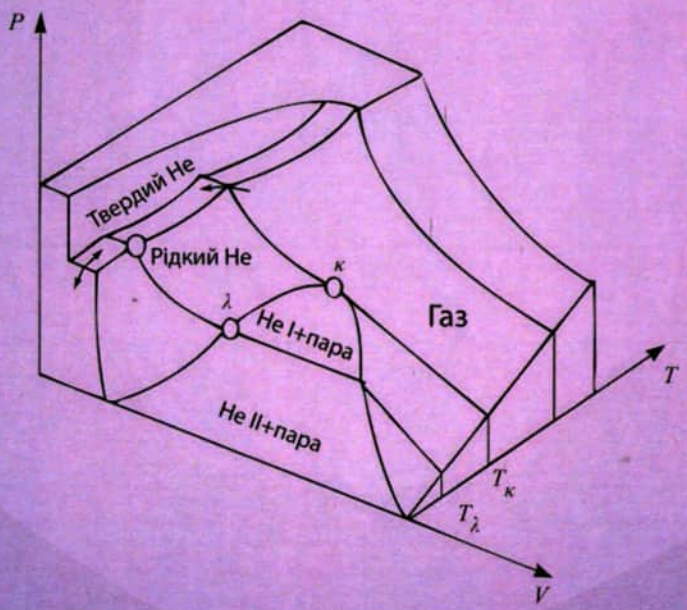
А. Франів, В. Стадник, В. Курляк

ФІЗИКА НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР



Зміст

Передмова..... 7
Розділ 1. КРІОГЕНІКА..... 9
1.1. Загальні відомості про низькі температури. Головні історичні етапи розвитку кріогеніки..... 9
1.2. Міжнародна практична шкала температур..... 17
1.2.1. Загальні відомості про температуру..... 17
1.2.2. Принцип недосяжності нуля абсолютної температури..... 21
1.3. Основні термодинамічні співвідношення у фізиці низьких температур..... 24
1.4. Властивості робочих речовин кріогенних систем..... 31
1.4.1. Рівноважні стани і фазові переходи..... 31
1.4.2. Фазові перетворення та властивості основних кріогазів..... 44
1.4.3. Властивості і перетворення водню..... 48
1.5. Фазові перетворення і властивості гелію..... 51
1.5.1. Загальні властивості гелію..... 51
1.5.2. λ-перехід у гелію..... 55
1.5.3. Явище надплинності..... 57
1.5.4. Другий звук у He II..... 69
1.6. Властивості сумішей гелію..... 74
1.7. Теплофізичні властивості біоматеріалів..... 75
Контрольні запитання і завдання..... 79
Список літератури..... 80
Розділ 2. ОСНОВНІ ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ОТРИМАННЯ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР..... 81
2.1. Процеси, які супроводжуються зниженням температури за адіабатних умов..... 81
2.2. Зміна основних термодинамічних величин під час стискання реального газу..... 85
2.3. Дроселювання. Процес за постійної ентальпії 87
2.4. Процес охолодження за постійної внутрішньої енергії..... 98
2.5. Процес охолодження без зміни ентропії. Рівноважне адіабатне розширення газу в детандерах..... 100
2.6. Процес вихлопування або вільного випускання газу з балона..... 104
2.7. Процеси в адіабатній системі зі змінною масою..... 108
2.8. Відкачування парів киплячої рідини. Барботування газу через рідину..... 111

2.9. Процес охолодження з використанням робочого середовища в твердому стані..... 115
2.9.1. Адіабатне розмагнічування..... 116
2.9.2. Термоелектричне охолодження..... 124
2.9.3. Десорбційне охолодження..... 126
2.10. Процеси охолодження, засновані на використанні властивостей ^{4}He і ^{3}He..... 127
2.10.1. Охолодження шляхом розчинення ^{3}He в ^{4}He.. 127
2.10.2. Ефект Померанчука. Охолодження адіабатною кристалізацією..... 131
2.10.3. Інші процеси охолодження..... 133
Контрольні запитання і завдання..... 138
Список літератури..... 139
Розділ 3. ОСНОВНІ МЕТОДИ ОТРИМАННЯ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР 140
3.1. Цикл Карно як ідеальний цикл зрідження газів..... 140
3.2. Цикл з простим дроселюванням. Машина Лінде..... 143
3.3. Цикл з подвійним дроселюванням..... 144
3.4. Отримання низьких температур методом дроселювання (ефект Джоуля–Томсона)..... 147
3.5. Особливості теплопередачі кріогенних матеріалів та холодоагентів (теплообмінники та регенератори)..... 152
3.6. Теплоізоляція, коефіцієнт низькотемпературної теплоізоляції..... 154
3.7. Ректифікація та регенерація сумішей газів. Ректифікаційні колони..... 157
3.7.1. Регенерація сумішей..... 157
3.7.2. Теплоізоляція..... 159
3.7.3. Ректифікація сумішей..... 162
3.8. Одержання низьких температур відкачуванням парів гелію..... 165
3.9. Методи вимірювання низьких температур..... 167
3.10. Основне рівняння кріостатування..... 179
3.11. Методи кріостатування у фізиці низьких температур..... 185
Контрольні запитання і завдання..... 188
Список літератури..... 189
Розділ 4. КРІОГЕННІ СИСТЕМИ ТА УСТАНОВКИ..... 190
4.1. Класифікація кріогенних установок за призначенням... 190

4.2. Класифікація за способом отримання низьких температур..... 192
4.3. Реальні цикли у кріогенних установках. Головні параметри..... 196
4.4. Енергетичний баланс окремих ступенів охолодження..... 204
4.5. Кріогенні установки на зріджувальних циклах..... 206
4.6. Кріогенні системи з розширенням потоку в дросельному пристрої..... 210
4.7. Кріогенні установки рефрижераторного типу. Зберігання та транспортування кріогенних рідин..... 212
4.8. Функціональна схема роботи гелієвої станції..... 214
4.9. Конструктивні особливості азотних та гелієвих кріостатів для фізичних досліджень..... 217
4.10. Уніфікована терморегульована експериментальна кріостатна система..... 224
Контрольні запитання і завдання..... 229
Список літератури..... 230
Розділ 5. ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ ЗА НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР..... 231
5.1. Теплоємність та її температурна залежність..... 231
5.2. Динаміка кристалічної ґратки. Фононний спектр..... 234
5.3. Температурні залежність теплопровідності твердих тіл 242
5.4. Температурна залежність електропровідності металів та кристалів..... 246
5.4.1. Загальні відомості..... 246
5.4.2. Концентрація носіїв струму у власному напівпровіднику..... 253
5.4.3. Температурна залежність електропровідності власних напівпровідників.. 257
5.4.4. Температурна залежність електропровідності діелектричних кристалів.... 261
5.4.5. Особливості електропровідності в сегнетоелектриках..... 267
5.5. Низькотемпературна надпровідність..... 270
5.6. Низькотемпературні властивості діамагнетиків, парамагнетиків та феромагнетиків. Закон Кюрі–Вейса..... 275
5.7. Низкотемпературні властивості антиферомагнетиків. Точка Нееля..... 278

5.8. Термоелектричні явища. Ефекти Зеебека, Пельтьє і Томсона..... 279
5.9. Гальваномагнітні явища. Ефекти Холла, Еттингсгаузена та Нернста. Магнітоопір..... 285
Контрольні запитання і завдання..... 289
Список літератури..... 289
Розділ 6. ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ ЗА НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР..... 291
6.1. Спектри відбивання та поглинання..... 291
6.2. Температурна залежність спектральних характеристик екситону та ширини забороненої зони напівпровідника..... 295
6.3. Низькотемпературні квантово-розмірні ефекти в напівпровідникових нанокристалах..... 307
6.4. Рефрактивні властивості кристалів за низьких температур..... 312
6.4.1. Поведінка показників заломлення за низьких температур..... 312
6.4.2. Низькотемпературні зміни двопроменезаломлення..... 322
6.4.3. Температурно-баричні діаграми фазових переходів..... 329
Контрольні запитання і завдання..... 335
Список літератури..... 336
Додатки..... 338
Предметний покажчик..... 357