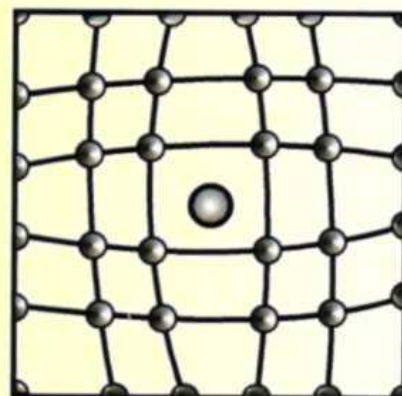
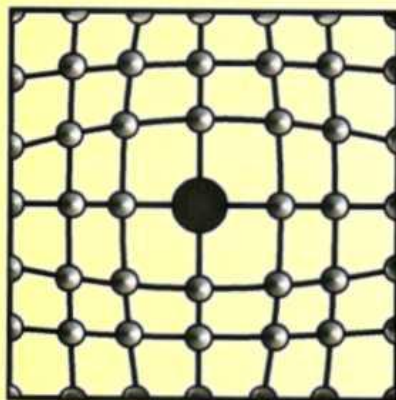
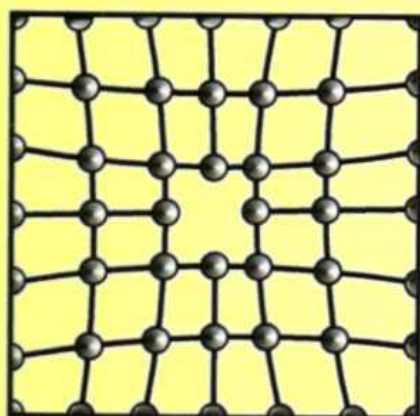


ПОДОПРИГОРА Н.В., САДОВИЙ М.І., ТРИФОНОВА О.М.

Фізика твердого тіла



навчальний посібник

Міністерство освіти і науки України
Кіровоградський державний педагогічний університет
імені Володимира Винниченка

ПОДОПРИГОРА Н.В., САДОВИЙ М.І., ТРИФОНОВА О.М.

Фізика твердого тіла

навчальний посібник

Кіровоград – 2014

УДК 53.01/.09:[538.9+539.2]

ББК 22.31

П 44

*Рекомендовано вченою радою Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка як навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей педагогічних університетів
(Протокол № 1 від 29 серпня 2014 року).*

П 44

Подопригора Н.В. Фізика твердого тіла: навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей педагогічних університетів / Подопригора Н.В., Садовий М.І., Трифонова О.М. – Кіровоград: ПП «Центр оперативної поліграфії «Авангард», 2014. – 416 с.

Рецензенти: д.пед.н., проф., **Вовкотруб Віктор Павлович**, завідувач кафедри фізики та методики її викладання Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка;

д.пед.н., проф., **Сусь Богдан Арсентійович**, професор кафедри загальної і теоретичної фізики Національного технічного університету України «КПІ»;

д.пед.н., проф., **Коновал Олександр Андрійович**, завідувач кафедри фізики та методики її навчання Криворізького педагогічного інституту Державного вищого навчального закладу «Криворізький національний університет».

У посібнику представлені основні поняття структурної кристалології: симетрії в кристалах; агрегатні, конденсовані, впорядковані та неупорядковані, метастабільні і стійкі стани речовини; теорія міжатомних і міжмолекулярних зв'язків, принципи побудови конденсованих систем. Розглянуті основні математичні моделі динаміки кристалічних ґрат; квантова теорія теплоємності твердого тіла у моделях Ейнштейна і Дебая; елементи зонної теорії твердих тіл щодо аналізу електромагнітних властивостей металів, напівпровідників і діелектриків, магнітні властивості речовини, надпровідність, плазмовий стан речовини; кінетичні явища в кристалах; теоретичні основи та застосування оптичних квантових генераторів. Досить широко представлені різноманітні математичні методи фізики, застосовні для опису поведінки класичних і квантових систем щодо аналізу властивостей твердих тіл на основі математичних моделей його структурних одиниць. Матеріал доповнено значною кількістю задач за відповідними темами, задачі систематизовані у вигляді практикуму з їх розв'язку.

Пропонований курс узгоджений із освітньо-професійною та навчальною програмами дисципліни «Фізика твердого тіла» підготовки магістрів: Галузь: 0402 Фізико-математичні науки. Спеціальність: 8.04020301 Фізика*, відповідно до галузевого стандарту педагогічної освіти.

Для студентів, аспірантів і викладачів педагогічних університетів.

УДК 53.01/.09:[538.9+539.2]

ББК 22.31

© Н.В. Подопригора, М.І. Садовий,
О.М. Трифонова, 2014

З М І С Т

ПЕРЕДМОВА

1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ФІЗИКИ ТВЕРДОГО ТІЛА

- 1.1. Поняття симетрії в кристалах
- 1.2. Агрегатні стани речовини
- 1.3. Конденсовані стани
- 1.4. Невпорядкований та впорядкований стани
- 1.5. Метастабільний та стійкий стани
- 1.6. Дальній та ближній порядок
- 1.7. Аморфні тіла
- 1.8. Природа міжатомних та міжмолекулярних зв'язків, їх типи

2. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ КРИСТАЛІЧНОГО СТАНУ РЕЧОВИНИ

- 2.1. Кристалічні ґрати. Елементарна комірка та її параметри
- 2.2. Трансляційна симетрія ґрат. Вектор трансляції. Типи кристалічних сингоній. Ґрати Браве
- 2.3. Дефекти кристалічних ґрат
- 2.4. Дифракція на ідеальних кристалічних ґратах, умова Вульфа-Брегга

3. ДИНАМІКА КРИСТАЛІЧНИХ ҐРАТ

- 3.1. Елементи теорії пружності
- 3.2. Тепловий рух у кристалі. Пружні коливання
- 3.3. Коливання одновимірного кристала (ланцюжка) з частинок одного сорту
- 3.4. Коливання ланцюжка з частинок двох сортів. Оптична та акустична гілки
- 3.5. Квантування коливань кристалічних ґрат, квазічастинки – фонони
- 3.6. Тривимірний кристал. Нульові коливання ґрат

4. ТЕПЛОЄМНІСТЬ КРИСТАЛІВ

- 4.1. Теплоємність твердого тіла за високих і низьких температур. Емпіричний закон Дюлонга і Пті та класична теорія теплоємності кристалів
- 4.2. Квантово-статистичні основи теорії теплоємності твердих тіл
- 4.3. Теорія теплоємності Ейнштейна
- 4.4. Теорія теплоємності кристалічних ґрат в моделі Дебая. «Закон кубів» Дебая. Характеристична температура Дебая

5. ЕЛЕМЕНТИ ЗОННОЇ ТЕОРІЇ КРИСТАЛІВ

- 5.1. Енергетичні рівні вільних атомів
- 5.2. Узагальнювання електронів в кристалі
- 5.3. Електрон в ідеальному кристалі
- 5.4. Динаміка руху електронів у кристалі. Ефективна маса
- 5.6. Поділ кристалічних твердих тіл на провідники, напівпровідники та діелектрики

6. МЕТАЛИ

- 6.1. Характерні ознаки металічного стану. Електрони провідності в металах

6.2. Розподіл електронів у металі за абсолютного нуля температур. Середня енергія електронів у металах. Енергія Фермі

6.3. Вироджений та невироджений електронний газ

6.4. Електропровідність металів та її залежність від температури

7. НАПІВПРОВІДНИКИ

7.1. Характерні ознаки напівпровідникового стану. Однорідні напівпровідники без домішок

7.2. Розподіл електронів у власних напівпровідниках

7.3. Температурна залежність власної провідності та рухливості вільних носіїв заряду у напівпровідниках

7.4. Домішкова провідність однорідних напівпровідників. Донорні та акцепторні домішки

7.5. Статистика електронів у домішкових напівпровідниках

7.6. Неоднорідні напівпровідники. Утворення p-n-переходу на межі областей кристалу з різним типом провідності

8. ДІЕЛЕКТРИКИ

8.1. Електричні властивості діелектриків. Електрична міцність

8.2. Статична електрична поляризація діелектриків

8.3. Поляризація неполярних діелектриків. Поляризація зміщення: електронна та іонна. Середнє та ефективне поле в діелектриках. Формула Лоренц-Лоренца

8.4. Діелектрична сприйнятливність полярних діелектриків. Формула Клаузіуса-Моссотті

8.5. Діелектрики в змінних електричних полях. Пружно зв'язані електрони та їх вимушені коливання

9. КІНЕТИЧНІ ЯВИЩА В КРИСТАЛАХ

9.1. Закон Відемана-Франца. Стала Лоренца

9.2. Термоелектричні явища. Об'ємна термо-ЕРС в однорідних напівпровідниках. Прямий та обернений термоелектричні ефекти. Термоелементи

9.3. Гальваномагнітні явища. Ефект Холла у напівпровідниках та його практичне використання

10. МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИНИ

10.1. Взаємодія магнітів. Джерела магнітного поля. Силові характеристики електромагнітного поля

10.2. Магнітне поле в магнетиках. Намагнічування

10.3. Елементарні носії магнетизму в атомах і молекулах речовини. Гіромагнітні явища

10.4. Магнітний момент атома. Спектральна класифікація атома

10.5. Класифікація магнітних матеріалів. Парамагнетики і діамагнетики. Температурна залежність намагніченості парамагнетиків

10.6. Магнітні властивості електронного газу в металах (парамагнетизм Паулі, діамагнетизм Ландау)

10.7. Магнітне упорядкування. Феромагнетики. Крива намагнічування. Спонтанне намагнічення доменів

10.8. Молекулярне поле Вейса. Ефект Баркгаузена

11. НАДПРОВІДНІСТЬ

11.1. Відкриття надпровідності. Критичні параметри надпровідного стану речовини. Ефект Мейснера

11.2. Квантування магнітного потоку. Рівняння Лондонів. Куперівські пари. Довжина когерентності

11.3. Магнітні властивості надпровідних матеріалів. Перспективи практичного використання надпровідності

12. ОПТИЧНІ КВАНТОВІ ГЕНЕРАТОРИ

12.1. Спонтанне та індуковане випромінювання. Стан системи з інверсною заселеністю. «Від'ємні» абсолютні температури

12.2. Трирівнева схема оптичного квантового генератора. Накачування. Квантовий підсилювач

12.3. Гелій-неоновий лазер. Твердотілий оптичний квантовий генератор на рубіні.

12.4. Застосування оптичних квантових генераторів

13. ПЛАЗМОВИЙ СТАН РЕЧОВИНИ

13.1. Плазмовий стан речовини у Всесвіті. Деякі способи утворення плазми. Основні властивості і параметри плазми

13.2. Елементарні процеси у плазмі

13.3. Коливання і хвилі у плазмі. Ленгмюрівська частота власних коливань у плазмі. Поширення електромагнітних хвиль у плазмі

13.4. Перспективні напрямки дослідження фізики плазми

ПРАКТИКУМ З РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧ

1. Енергія зв'язку кристалів

2. Геометрія кристалічних ґрат твердого тіла

3. Динаміка кристалічних ґрат. Теплоємність твердих тіл

4. Зонна теорія твердих тіл

5. Електронна теорія металів

6. Електронні властивості напівпровідників

7. Контактні явища

8. Поляризація діелектриків

9. Магнітні властивості речовини

10. Надпровідність

11. Речовина у стані плазми

ДОДАТКИ

ЛІТЕРАТУРА

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

П Е Р Е Д М О В А

Фізика твердого тіла є одним з фундаментальних розділів сучасної фізики, який містить у собі велику кількість фізичних теорій, які охоплюють всі сучасні уявлення про будову речовини, є фундаментом знань про характер процесів та явищ. Цей розділ фізики відіграє вирішальну роль у завершенні підготовки фахівця – фізика, формує науковий світогляд майбутнього викладача фізики, який згідно галузевого стандарту педагогічної освіти повинен мати цілісні уявлення про сучасну картину світу, вміти розв'язувати практичні і теоретичні задачі сучасної фізики, бути підготовленим до сприймання нових ідей фізики ХХІ сторіччя.

Фізика твердого тіла охоплює експериментальне та теоретичне вивчення структури, фізичних властивостей та кінетичних явищ в кристалічних та аморфних середовищах, вивченням впливу зовнішніх полів, іонізуючої радіації, потоків частинок на мікро- і макрорівнях за різних умов. Дослідження використовують методи, які є основою сучасної прикладної фізики і містять результати, що можуть бути використані для матеріалів різних типів. Областями досліджень є експериментальні та теоретичні дослідження у таких напрямках:

- Вивчення міжатомної взаємодії, принципів та законів, за якими формується структура твердих тіл та рідких кристалів, кріоцисталів. Симетричні аспекти фізики твердого тіла.

- Енергетичний спектр твердих тіл (фонони, спектри електронних збуджень, магнони та ін.) та методи його вивчення (оптична та фотоакустична спектроскопія тощо). Оптичні властивості екситонів та інших квазічастинок, в тому числі при інтенсивному збудженні. Експериментальне та теоретичне вивчення взаємодій між квазічастинками.

- Вивчення впливу зовнішніх факторів (температури, механічних напружень, статичних електричних та магнітних полів, електромагнітного поля, радіаційного опромінення) на фізичні властивості твердих тіл та встановлення особливостей кінетичних і релаксаційних процесів, зумовлених цим впливом.

- Термодинаміка та фазові перетворення в твердих тілах. Атомна структура та фазові переходи в адсорбованих шарах на поверхні твердих тіл та у плівках.

- Експериментальне і теоретичне вивчення нелінійних дисипативних структур. Властивості твердотільної плазми.

- Взаємодія твердих тіл з потоками частинок іонізуючого та потужного електромагнітного опромінення. Дефектоутворення, радіаційні дефекти, електронно-стимульовані реакції дефектів, метастабільність.

- Дефекти кристалічної будови, еволюція дефектної структури під впливом зовнішніх факторів, взаємодія дефектів, вплив дефектної структури на фізико-механічні та кінетичні властивості твердих тіл.

- Експериментальні та теоретичні методи аналізу дефектної структури, математичне моделювання, розрахунки параметрів структури та фізико-механічних властивостей твердих тіл.

- Домішки та їхні агрегати, їхня динаміка і перебудова, сегрегаційні явища, дифузійні явища у твердих тілах та на їхній поверхні.

- Екстремальні властивості та структурні стани, нанокристали, квазікрystalи, аморфізація.

- Фізичні основи міцності та пластичності твердих тіл.

- Фізичні властивості низьковимірних систем. Фізичні основи цілеспрямованого формування складу та структури матеріалів у компактному та низьковимірних станах, що мають нові корисні властивості. Механізми формування структури та фізичні властивості тонких плівок (аморфних полі- та монокристалічних), у тому числі багат шарових.

- Змішані кристали та неупорядковані тверді тіла. Фізика твердих розчинів неметалічних речовин, у тому числі напівмагнітних кристалів.

- Високо частотні і резонансні явища у твердих тілах. Вплив дефектної структури, домішкових атомів і зовнішніх полів на високо частотні, резонансні і осциляційні явища в твердих тілах.

- Твердотільні аспекти фізичних процесів у біоматеріалах та в біологічних структурах.

Пропонований посібник являє собою представлення тих розділів фізики твердого тіла, які найяскравіше унаочнюють генезис її розвитку щодо предмету дослідження – вивченню кристалічних твердих тіл і поведінки електронів у цих тілах, що зводиться, передусім, до встановлення зв'язку між властивостями окремих атомів та молекул та властивостями, які спостерігаються під час об'єднання цих атомів та молекул у велетенські асоціації у вигляді регулярно-впорядкованих систем – кристалів. Ці властивості пояснюються шляхом побудови простих фізичних моделей твердих тіл. Звичайно реальні кристали та аморфні тіла значно складніші, ніж збудовані фізиками моделі, але ефективність та корисність простих моделей навряд чи можна переоцінити. У посібнику представлені елементи теорії структурної кристалофізики: симетрії в кристалах; агрегатні, конденсовані, впорядковані та неупорядковані, метастабільні і стійкі стани речовини; теорія міжатомних і міжмолекулярних зв'язків, принципи побудови конденсованих систем. Розглянуті: основні теоретичні моделі динаміки кристалічних ґрат, квантова теорія теплоємності твердого тіла у моделях Ейнштейна і Дебая; елементи зонної теорії твердих тіл та її застосування до аналізу електричних властивостей металів, напівпровідників і діелектриків, магнітних властивостей речовини, надпровідності, плазмового стану речовини; теоретичні основи та застосування основних кінетичних явищ в кристалах; оптичних квантових генераторів тощо. Досить широко представлені різноманітні математичні методи фізики, застосовні для опису поведінки класичних і квантових систем під час аналізу властивостей твердих тіл шляхом математичного моделювання структурних одиниць досліджуваної речовини.

Щодо методів дослідження, фізика твердого тіла розглядається, як правило, або з теоретичної, або з експериментальної точки зору. Перший підхід є найбільш загальним, можливо через достатню розробленість математичних методів квантової фізики. Проте на практиці розв'язання задач фізики твердого тіла виявляється достатньо утрудненим. Наприклад, обрахунки електричного питомого опору металів, який порівняно легко можна виміряти, теоретично

виконати виявляється порівняно складно, виходячи з принципів квантової механіки, оскільки задача є перенасиченою спрощеннями, до яких потрібно удаватися щоб описати електронну структуру твердого тіла навіть у моделі одного атому. Тому у презентації основних теоретичних викладок посібника ми звертаємося до комплексного представлення як експериментальної так і теоретичної точок зору. Експеримент, що є засобом і необхідною умовою постановки фізичної задачі, разом з тим, є й критерієм істинності теоретичних розрахунків. Тому у пропоновану посібнику ми спробували показати тим, хто вивчає фізику твердого тіла, яким чином із експериментальних досліджень може бути отримана якісна, а інколи й кількісна інформація стосовно електронної структури речовини. Значущість результату, отриманому у такий спосіб, полягає у тому, що той хто вивчає фізику твердого тіла входить у неї найбільш реалістичним шляхом, стимулюючим подальший розвиток знань.

Пропонований посібник забезпечує вивчення дисципліни «Фізика твердого тіла», що входить до циклу дисциплін професійної і практичної підготовки магістрів: Галузь: 0402 Фізико-математичні науки. Спеціальність: 8.04020301 Фізика*, відповідно до освітньо-професійної та навчальної програм дисципліни, та галузевого стандарту педагогічної освіти.

Усі, нині діючі, державні стандарти вищої освіти в основу навчання закладають самостійну, творчу роботу студента. У структурі навчального навантаження студента індивідуальна робота розглядається як один із основних чинників освіти і повинна займати близько половини його навчального навантаження. Пропонований навчальний посібник, насамперед, покликаний забезпечити самостійну підготовку студентів і на 90% забезпечує виконання навчальної програми курсу. Теоретичний матеріал доповнено питаннями для самоконтролю, практикумом з розв'язку задач (прикладні розв'язки, задачі для самостійного розв'язання, довідково-інформаційні дані для розв'язання задач), апарат для орієнтації в матеріалах книги (предметний покажчик).

ПОДОПРИГОРА НАТАЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

САДОВИЙ МИКОЛА КЛІМЧ

ТРИФОНОВА ОЛЕНА МИХАЙЛІВНА

ФІЗИКА ТВЕРДОГО ТІЛА

Навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей некласических університетів

Підписано до друку 02.12.2013. Формат 60x84. Папір офсетний.
Друк ризограф. Ум. друк арк. 33. Тираж 100 прим. Зам. № 4387.



м. Кіровоград, вул. Пашутінська, 12, оф. 4

Тел./факс: 24-86-34, 27-02-24

тел. /050, 531-73-72, 341-04-33

<http://avangard.kr.ua>, info@avangard.kr.ua