



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з науково-педагогічної роботи  
В.Л. Шаран  
Ініціали та прізвище  
17 вересня 20 19 р.

**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**  
**ТЕОРІЯ РЕЛАКСАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У КВАНТОВИХ ГЕТЕРОСИСТЕМАХ**

Назва

Галузь знань 10 Природничі науки  
Спеціальність 104 Фізика та астрономія  
Освітня програма Фізика та астрономія  
Статус дисципліни Вибіркова  
Навчально-науковий інститут фізики, математики, економіки та інноваційних технологій  
Кафедра фізики  
Мова навчання українська  
Дані про вивчення дисципліни

Форма навчання	Курс	Семестр	Обсяг дисципліни: год / кредити ЄКТС	Кількість годин						Курсова робота	Вид семестрового контролю	
				Аудиторні заняття					Самостійна робота		Залік	Екзамен
				Разом	Лекції	Лабораторні роботи	Практичні заняття	Семінарські заняття				
Денна	2	3	120 / 4	46	16	–	30	–	74	–	–	+

Робоча програма складена на основі освітньої програми та навчального плану підготовки докторів філософії (240 кредитів ЄКТС).

Розробник

І.В. Білинський  
Ініціали та прізвище викладача, науковий ступінь та вчене звання

Погоджено керівником групи забезпечення спеціальності:

Р.М. Пелешак  
Ініціали та прізвище, науковий ступінь та вчене звання

Схвалено на засіданні кафедри фізики.

Протокол № 7 від 30 серпня 20 19 р.

Завідувач кафедри

Р.М. Пелешак  
Ініціали та прізвище

Схвалено на засіданні науково-методичної ради навчально-наукового інституту фізики, математики, економіки та інноваційних технологій.

Протокол № 6 від 02 вересня 20 19 р.

Схвалено на засіданні науково-методичної ради університету.

Протокол № 7 від 17 вересня 20 19 р.

## 1. МЕТА ВИВЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

**Мета:** формування теоретичних знань та практичних навичок у галузі впливу електромагнітного випромінювання на електронну та діркову підсистеми гетеросистем напівпровідників.

**Предмет:** ґрунтовне з'ясування фізичного змісту розглядуваних процесів і явищ, які можуть відбуватись при різного роду впливах зовнішніх факторів на гетеросистеми напівпровідників.

**Завдання:**

- формування в студентів наукового світогляду, розуміння природи як цілісної системи;
- вироблення умінь вірно висловлювати фізичні ідеї;
- вивчення дисципліни є ознайомлення студентів з процесами, які відбуваються в гетеросистем напівпровідників при рекомбінації нерівноважних електронно-діркових пар;
- визначати параметри локальних центрів у гетеросистемі напівпровідників;
- вироблення навичок самостійної роботи.

У результаті вивчення дисципліни “Теорія релаксаційних процесів у квантових гетеросистемах” студент повинен оволодіти такими компетентностями:

*Загальні компетентності:*

- здатність використовувати у професійній діяльності знання з галузей природничих наук;
- здатність вирішувати проблеми у професійній діяльності на основі абстрактного мислення, аналізу, синтезу та прогнозу;
- здатність до пошуку, оброблення й аналізу інформації з різних джерел, необхідної для розв'язування наукових і професійних завдань;
- здатність генерувати нові ідеї;
- здатність розробляти проекти та керувати ними;
- здатність до виконання дослідницької роботи з елементами наукової новизни.

*Фахові компетентності:*

- здатність будувати відповідні моделі природних явищ, досліджувати їх для отримання нових висновків та поглиблення розуміння природи;
- спроможність формулювати проблеми математично та в символічній формі з метою спрощення їхнього аналізу й розв'язання;
- спроможність виражати терміни специфічної предметної області мовою математики;
- здатність проводити обчислення в рамках основних математичних моделей та застосовувати необхідні математичні методи;
- спроможність використовувати обчислювальні інструменти для чисельних і символічних розрахунків та для постановки й розв'язування задач.

### *Програмні результати навчання:*

- розуміти принципи моделювання явищ фізики гетеросистем напівпровідників;
- володіти знаннями грамотної побудови комунікації в освітньому і науковому процесі, відбору вихідних даних дослідження, складання списку використаних джерел, опису наукових результатів;
- доносити професійні знання, власні обґрунтування і висновки до фахівців і широкого загалу;
- ініціювати і проводити наукові дослідження та/або розв'язувати фізичні задачі методами математичного моделювання;
- уміти самостійно планувати виконання дослідницького та/або інноваційного завдання та формулювати висновки за його результатами;
- розраховувати розмірне квантування в структурах зі складним зонним спектром;
- мати уявлення про методи розрахунку структур з пониженою розмірністю.

## **2. ПЕРЕДУМОВИ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

Вивчення курсу «Теорія релаксаційних процесів у квантових гетеросистемах» будується на знаннях студентів, одержаних при вивченні загальних та спеціальних дисциплін спеціальності, насамперед «Механіки», «Молекулярної фізики», «Електрики», «Оптики», «Термодинаміки», «Фізики твердого тіла». Цей курс включає розгляд наукових проблем, які знаходяться на стику фізичного матеріалознавства, фізики і хімії твердого тіла, біології, інформатики та інших дисциплін.

## **3. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАННЯ**

У результаті вивчення цієї навчальної дисципліни студенти повинні

### **знати:**

- особливості явищ переносу при нерівноважному розподілі зарядів;
- основні механізми рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в напівпровідникових гетеросистемах;
- люмінесценція та її механізми;
- фотоелектричні явища в напівпровідникових гетеросистемах.

### **вміти:**

- використовувати рівняння неперервності для розрахунку параметрів розподілу нерівноважних носіїв заряду в напівпровідникових гетеросистемах;
- визначати час життя вільних носіїв заряду в напівпровідникових гетеросистемах в залежності від положення рівня Фермі;
- знаходити фото  $e.h\nu$  в неоднорідних системах.
- формулювати проблему, що розглядається;

- порівнювати отримані експериментальні дані з даними інших джерел;

#### 4. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ

Оцінювання здійснюється за шкалами оцінювання: ЄКТС, стобальною і національною.

**А (90 – 100 балів)** – *відмінні знання та уміння лише з незначною кількістю несуттєвих помилок*: отримує студент, який виявляє глибокі системні знання програмного матеріалу та продуктивно їх використовує; виконує завдання самостійно за власним планом; володіє високим рівнем узагальнення та систематизації програмного матеріалу; дає точне визначення і тлумачення особливостей явищ переносу при нерівноважному розподілі зарядів; знає основні механізми рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в напівпровідникових гетеросистемах; дає точне визначення і тлумачення люмінесценції та її механізмів; знає фотоелектричні явища в напівпровідникових гетеросистемах; володіє уміннями та навичками самостійного проведення фізичних експериментів; уміє самостійно планувати виконання дослідницького та/або інноваційного завдання та формулювати висновки за його результатами; реалізовує всі етапи розв'язку фізичної задачі; вільно володіє різними методами і способами розв'язування фізичних задач; вільно розв'язує фізичні задачі різної складності; виконав усі види навчальної роботи.

**В (82 – 89 балів)** – *вище середнього рівня з кількома помилками*: отримує студент, знання та уміння якого відповідають вимогам програми; який вільно володіє навчальним матеріалом; застосовує отримані знання на практиці; володіє знаннями грамотної побудови комунікації в освітньому і науковому процесі; дає визначення і тлумачення особливостей явищ переносу при нерівноважному розподілі зарядів; знає основні механізми рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в напівпровідникових гетеросистемах; дає визначення і тлумачення люмінесценції та її механізмів; знає фотоелектричні явища в напівпровідникових гетеросистемах; однак, допускає неточності й не завжди може застосувати знання для розв'язання принципово нової для нього задачі; володіє міцними знаннями щодо постановки, класифікації, прийомів та методів розв'язування фізичних задач; будує математичну модель задачі; обирає раціональний спосіб розв'язування задачі, але розв'язує її з незначними помилками; вміє проводити фізичні експерименти; виконав усі види навчальної роботи.

**С (75 – 81 бал)** – *в цілому ґрунтовні системні знання з невеликою кількістю суттєвих помилок*: отримує студент, який виявив ґрунтовні й міцні знання програмного матеріалу; володіє усіма необхідними уміннями й навичками; дає визначення явищ переносу при нерівноважному розподілі зарядів; орієнтується в основних механізмах рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в напівпровідникових гетеросистемах; дає визначення люмінесценції та її механізмів; знає фотоелектричні явища в напівпровідникових гетеросистемах,

однак, допускає суттєві неточності; в цілому самостійно застосовує теоретичні знання на практиці; робить певні узагальнення; вільно розв'язує репродуктивні задачі; однак, при розв'язуванні пошукових та творчих задач зустрічається чимало неточностей або суттєва помилка; володіє методикою постановки і проведення фізичних експериментів; знає різні методи розв'язування задач з різних розділів фізики, але робить помилки під час їх застосування; немає глибокого розуміння фізичного змісту використаних понять; уміє інтерпретувати отримані розв'язки задач, результати проведеного фізичного експерименту та робити висновки; виконав усі види навчальної роботи.

**D (67 – 74 бали)** – *непогано, але зі значною кількістю недоліків*: отримує студент за знання і розуміння тільки основного програмного матеріалу; відтворює матеріал у спрощеній формі; може описати зв'язок між простими теоретичними закономірностями та розв'язує нескладні репродуктивні задачі; частково дає визначення явищ переносу при нерівноважному розподілі зарядів; частково орієнтується в основних механізмах рекомбінації нерівноважних носіїв заряду в напівпровідникових гетеросистемах; дає визначення люмінесценції; має уявлення про фотоелектричні явища в напівпровідникових гетеросистемах; відчуває значні труднощі під час розв'язування прикладних задач; недостатньо володіє методами розв'язування задач та аналізу побудованої моделі задач; з допомогою викладача здатен проводити фізичні експерименти, інтерпретувати, аналізувати та оцінювати отримані результати; виконав усі види навчальної роботи.

**E (60 – 66 балів)** – *знання та уміння задовольняють мінімальним критеріям*: отримує студент, знання та уміння якого задовольняють мінімальним критеріям відповідно до програми; який може відтворити більше половини навчального матеріалу на репродуктивному рівні з елементами логічних зв'язків; може описати зв'язок між елементарними теоретичними закономірностями та розв'язує найпростіші репродуктивні задачі; частково дає визначення явищ переносу при нерівноважному розподілі зарядів; має найпростіше уявлення про фотоелектричні явища в напівпровідникових гетеросистемах; відчуває значні труднощі під час розв'язування прикладних задач; допускає суттєві неточності, робить грубу помилку, аналізуючи побудовану модель фізичної задачі; з допомогою викладача здатен інтерпретувати отримані результати та робити висновки; виконав усі види семестрової навчальної роботи, але зі значними недоліками.

**FX (35 – 59 балів)** – *незадовільні знання з можливістю повторного складання екзамену*: отримує студент за поверхневе знання і розуміння основного програмного матеріалу; непослідовний виклад матеріалу з допущенням суттєвих помилок; який не вміє робити узагальнення та висновки; не вміє застосовувати теоретичні знання при розв'язуванні прикладних задач; необізнаний в питаннях, винесених на самостійне опрацювання; не орієнтується в теоретико-методологічних засадах розв'язування фізичних задач та проведення фізичних експериментів; не вміє застосовувати методи розв'язування задач на

практиці; не володіє методами аналізу побудованої моделі фізичної задачі; не виконав усіх видів навчальної роботи.

**F (0 – 34 бали)** – виставляється у випадку, коли студент володіє лише окремими поняттями, фрагментарними знаннями програмного матеріалу без жодного взаємозв'язку між ними; за відсутності сформованих умінь та навичок, що унеможливилює побудову ним математичної моделі задачі, розв'язування прикладних задач; при цьому ж студент не виконав усіх видів навчальної роботи.

## **5. ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ**

- контрольні роботи;
- захист індивідуального навчально-дослідницького завдання;
- екзамен.

## **6. ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

### **1. Структури з пониженою розмірністю**

1.1. Квантування енергії в твердотільних структурах.

1.2. Квантові ями.

1.2.1. Прямокутна потенціальна яма з нескінечно високими стінками.

1.2.2. Симетрична яма зі стінками скінченної висоти.

1.2.3. Несиметрична яма з прямокутним рельєфом.

1.2.4. Квантова яма з лінійно мінливим потенціалом.

1.2.5. Квантова яма з експоненціальним рельєфом.

1.3. Тунельно-з'язані квантові ями.

1.4. Квантові нитки і точки.

1.4.1. Прямокутна нитка і точка з нескінченними бар'єрами.

1.4.2. Циліндрична квантова нитка.

1.4.3. Сферична квантова точка.

1.4.4. Параболічна квантова точка.

1.5. Метод матриць переносу.

1.5.1. Визначення матриці переносу.

1.5.2. Рух електрона в полі прямокутного бар'єру.

1.5.3. Відбивання електрону від потенціальної ями.

1.5.4. Квантування енергії електрона в потенціальній ямі.

1.6. Резонансне тунелювання.

1.7. Надгратки.

1.8. Густина станів і статистика електронів в системах зі зниженою розмірністю .

1.8.1. Густина станів у тривимірному кристалі.

1.8.2. Густина станів у двовимірній квантовій ямі.

1.8.3. Густина станів у одновимірній нитці.

- 1.8.4. Густина станів в квантовій точці.
- 1.8.5. Густина станів у надгратці.
- 1.8.6. Концентрація носіїв заряду в квантовій ямі.

## **2. Розмірне квантування в структурах зі складним зонним спектром.**

- 2.1. Визначення квантових станів електрона в періодичному полі кристала.
  - 2.1.1. Рівняння Шредінгера для хвильових функцій Блоха.
  - 2.1.2. Метод кр-збурень.
  - 2.1.3. Спін-орбітальна розщеплена зона.
  - 2.1.4. Гамільтоніан моделі Кейна.
  - 2.1.5. Непараболічність зон в моделі Кейна.
  - 2.1.6. Гамільтоніан Латтінжера.
- 2.2. Метод огинаючих функцій в задачах розмірного квантування енергії електронів в гетероструктурах.
- 2.3. Розмірне квантування електронних станів із врахуванням кейнівської непараболічності.
  - 2.3.1. Рівняння для огинаючих функцій в моделі Кейна.
  - 2.3.2. Метод матриці переносу в багатозонних моделях.
  - 2.3.3. Вплив непараболічності на підзони квантової ями.
  - 2.3.4. Граничні стани в моделі Кейна.
  - 2.3.5. Розмірно-квантовані стани дірок в тризонній моделі Кейна.
- 2.4. Трансформація легких і важких дірок.
  - 2.4.1. Прямокутна нескінченна яма в моделі Латтінжера.
  - 2.4.2. Квантова яма зі скінченим бар'єром в моделі Латтінжера.
- 2.5. Інтерфейсні стани в гетероструктурі з безщілиним напівпровідником.
- 2.6. Розмірне квантування в анізотропній енергетичній зоні.
  - 2.6.1. Рівняння розмірного квантування енергії в багатодолинній зоні провідності.
  - 2.6.2. Прямокутна нескінченна яма з анізотропною зоною провідності.
  - 2.6.3. Інверсійний шар в кремнії р-типу.
  - 2.6.4. Структури з бар'єрами скінченої висоти.
- 2.7. Напружені гетероструктури.
  - 2.7.1. Тензор пружної деформації псевдоморфного шару.
  - 2.7.2. Гамільтоніан Біра-Пікуса.
  - 2.7.3. П'єзоелектричний ефект.

## **3. Релаксаційні процеси в масивних напівпровідниках**

Явища переносу вільних носіїв заряду. Неоднорідний розподіл носіїв заряду. Дифузійний і дрейфовий струм. Напруженість електричного поля, пов'язаного з об'ємним зарядом неоднорідного напівпровідника. Час релаксації об'ємного заряду. Електронно-діркова рекомбінація, час життя неосновних носіїв заряду. Дрейфова рухливість неосновних носіїв заряду в напівпровідниках. Метод випромінювання рухливості електронів і дірок. Основні механізми рекомбінації нерівноважних носіїв заряду. Випромінювальна рекомбінація. Рекомбінація з участю домішкових центрів. Рекомбінація нерівноважних носіїв заряду. ОЖЕ

рекомбінація. Рекомбінація на дислокаціях. Поверхнева рекомбінація Оптичні та фотоелектричні явища в напівпровідниках. Види люмінесценції. Рекомбінаційна люмінесценція. Кінетика затухання рекомбінаційної люмінесценції. Кінетика затухання рекомбінаційної люмінесценції при наявності центрів захоплення. Оптичне звільненні захоплених центрами електронів і дірок. Фотопровідність. Стаціонарний час життя. Центри прилипання у фотопровідниках.

### **Тематика практичних занять**

1. Визначення часу релаксації об'ємного заряду
2. Рівняння неперервності і його використання для розрахунку параметрів розподілу нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках.
3. Розподіл нерівноважних носіїв заряду при неоднорідному збудженні. Дифузійний шлях носіїв заряду. Інжекція та екстракція нерівноважних носіїв заряду.
4. Визначення дрейфової рухливості неосновних носіїв заряду в напівпровідниках.
5. Рекомбінація неосновних носіїв заряду на дислокаціях.
6. Визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках n-чи p-типу провідності в залежності від положення рівня Фермі.

## **7. ІНДИВІДУАЛЬНІ НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНІ ЗАВДАННЯ**

Індивідуальні завдання – це частина навчального матеріалу з дисципліни, що має на меті поглибити, узагальнити та закріпити знання, отримані студентами у процесі навчання, а також застосування цих знань на практиці.

Звіт про виконання індивідуального завдання повинен містити титульну сторінку (згідно зразка) та змістове наповнення до 10 аркушів. Звіт про виконання індивідуального завдання – це завершена робота теоретичного або практичного характеру, яка містить систематизований чітко викладений матеріал за обраною темою на основі спеціально підібраної літератури. Захист індивідуального завдання відбувається не пізніше, ніж за два тижні до закінчення семестру.

Критерії оцінювання індивідуального завдання: повнота розкриття теми у роботі – 15 балів, якість мовного оформлення – 3 бали, якість бібліографічного опису – 2 бали.

1. Рівняння неперервності.
2. Рекомбінація за участю домішкових центрів.
3. Залежність часу життя носіїв заряду від положення рівня Фермі в напівпровіднику.



4. Оптичне звільнення захоплених центрами електронів і дірок. Модель потенціальних кривих.
5. Квазірівні Фермі.
6. Центри прилипання в фотопровідниках. Демаркаційні рівні.
7. Неоднорідності в напівпровідниках і їх вплив на енергетичні параметри електронів в зонах. Приклади деяких типових неоднорідностей, які мають місце в напівпровідниковій електроніці.
8. Особливості розподілу енергетичних електронних станів в неоднорідних напівпровідниках, утворення хвостів щільності станів в забороненій зоні напівпровідника.
9. Локалізовані і делокалізовані електронні стани, рівень протікання. Поняття про квазічастинки.

## **8. ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ**

Самостійна робота студента з дисципліни передбачає опрацювання теоретичного матеріалу, виконання завдань у межах кожної теми робочої програми, підготовку до контрольних робіт, захисту індивідуального навчально-дослідницького завдання.

Перелік завдань для самостійної роботи студентів:

1. Особливості оптичних переходів в неоднорідних напівпровідниках, правило Урбаха.
2. Вплив на край смуги власного поглинання світла в напівпровідниках статичного і динамічного безпорядку (розупорядкування кристалічної ґратки).
3. Приклади неупорядкованих систем. Електропровідність неупорядкованих напівпровідників.
4. Електронно-діркова зонно-зонна рекомбінація носіїв заряду, час життя неосновних носіїв заряду і приклади його визначення.
5. Основні види рекомбінації через домішкові центри і їх особливості. Моделі рекомбінаційних процесів.

## **9. ФОРМИ ПОТОЧНОГО ТА ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ**

Засвоєння студентами матеріалу з дисципліни перевіряється контрольними роботами, виконанням індивідуального навчально-дослідницького завдання та екзаменом. Також студенти повинні бути готовими до експрес-контролю на лекціях (фронтальне опитування, співбесіда, письмовий тест). Поточний контроль знань здійснюється з метою перевірки рівня підготовленості студента до практичного заняття та рівня засвоєння ним навчального матеріалу. Результати поточного контролю (поточна успішність) враховуються при виставленні підсумкових балів з даної дисципліни, вивчення якої завершується екзаменом.

Виконання практичних робіт передбачає теоретичну підготовку до роботи (опрацювання теоретичного матеріалу). Кожне практичне заняття

оцінюється у 3 бали. Контрольні роботи, окрім тестових завдань, обов'язково передбачають теоретичні дослідження та вміння студента застосовувати теоретичні знання для розв'язування прикладних задач. У контрольній роботі зазначається кількість балів за правильне виконання кожного з її завдань з урахуванням їх складності, обсягу та значущості в засвоєнні дисципліни.

Екзамен проводиться протягом терміну, визначеного навчальним графіком для складання екзаменів, у вигляді письмового виконання завдань та співбесіди з викладачем. Екзаменаційні завдання охоплюють весь програмний матеріал дисципліни “ Теорія релаксаційних процесів у квантових гетеросистемах ”.

Сумарна кількість балів з дисципліни визначається як сума балів з усіх видів навчальної роботи і виставляється за трьома шкалами оцінювання: стобальною, національною і ЄКТС.

Екзамен за талонами № 2 і К проводиться в письмовій формі з оцінюванням за стобальною шкалою. Завдання охоплюють весь програмний матеріал даної навчальної дисципліни.

Розподіл 100 балів між видами робіт:

Поточний контроль та самостійна робота			Сума	Екзамен
Практичні роботи (ПР)	Контрольна робота	Індивідуальне завдання	$S_{\text{пот}}$	$S_{\text{підс}}$
ПР	КР			
		ІЗ		
45	40	15	100	100

Сумарна кількість балів з дисципліни визначається за формулою:

$$S_{\text{сум}} = 0,6 \cdot S_{\text{пот}} + 0,4 \cdot S_{\text{підс}}$$

## 10. ІНСТРУМЕНТИ, ОБЛАДНАННЯ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

На практичних заняттях з дисципліни студенти набувають практичних навичок проведення можливого чисельного експерименту. Виконання практичних робіт вимагає наявності відповідних приладів і матеріалів, які зазначені в методичних рекомендаціях до практичних робіт.

Для захисту індивідуальних завдань студентам необхідна програма підготовки презентацій Microsoft PowerPoint, мультимедійний проектор, математичне середовище "Mathematica".

## 11. РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

### Рекомендована література

#### Основна

1. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников./ Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. -М.: Наука, 1977. -672 с.
2. Панков Ж.Г. Оптические процессы в полупроводниках./ Панков Ж.Г.-М.: Мир, 1973. -456 с.
3. Ридли Б. Квантовые процессы в полупроводниках./ Ридли Б. -М.: Мир, 1986. -304 с.
4. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках./ Рывкин С.М. -М.: Физматгиз, 1965. -494с.

#### Допоміжна

1. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников./ Уханов Ю.И. -М.: Наука, 1977. -366 с.
2. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. / Фистуль В.И. -М.: Высш. шк., 1984. -352 с.
3. Hummel R.E. Electronic Properties of Materials./ Hummel R.E. – Berlin:Springer, 1993.–154s

### Інформаційні ресурси

1. Електронний архів наукових та освітніх матеріалів КПІ ім. Ігоря Сікорського: <http://ela.kpi.ua/>
2. Науковий репозитарій Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича:  
<http://www.library.chnu.edu.ua/index.php?page=/ua/04fondy>
3. Електронний науковий архів Науково-технічної бібліотеки Національного університету “Львівська політехніка”: <http://ena.lp.edu.ua:8080/>
4. Мультидисциплінарний відкритий електронний архів ELibUkr-OA: <http://oa.elibukr.org/>
5. PhET : онлайн-моделі : Фізика:  
<https://phet.colorado.edu/uk/simulations/category/physics>