

Методичні вказівки
до виконання самостійної роботи з дисципліни
«Електронні прилади та пристрої квантової електроніки»
для студентів спеціальності
171 – «Електроніка»

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Методичні вказівки
до виконання самостійної роботи з дисципліни
«Електронні прилади та пристрої квантової електроніки»
для студентів спеціальності
171 – «Електроніка»

Вінниця
ВНТУ
2020

Рекомендовано до друку Методичною Радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 21.11.2019 р.)

Рецензенти:

С. Т. Барась, кандидат технічних наук, професор

О. С. Городецька, кандидат технічних наук, доцент

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи з дисципліни «Електронні прилади та пристрої квантової електроніки» для студентів спеціальності 171 – «Електроніка» / Уклад. Б. П. Книш. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 16 с.

У методичних вказівках наведено основні теоретичні дані до виконання самостійної роботи з дисципліни «Електронні прилади та пристрої квантової електроніки» і рекомендовану літературу. Методичні вказівки розроблено відповідно до навчальної програми дисципліни «Електронні прилади та пристрої квантової електроніки»

ЗМІСТ

Тема 1. Спектр електромагнітного випромінювання.....	4
Тема 2. Особливості оптичного діапазону.....	5
Тема 3. Інверсна заселеність енергетичних рівнів	6
Тема 4. Випромінювальні та безвипромінювальні квантові переходи	7
Тема 5. Магнетон Бора.....	8
Тема 6. Квант коливання кристалічної ґратки.....	9
Тема 7. Добротність спектральних ліній	10
Тема 8. Квантування енергій двохатомної молекули.....	11
Тестові завдання.....	14

ТЕМА 1. СПЕКТР ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Мета: отримання знань щодо електромагнітного випромінювання та його спектра.

Електромагнітне випромінювання – взаємопов'язані коливання електричного (E) і магнітного (B) полів, що утворюють електромагнітне поле.

Поширення випромінювання здійснюється за допомогою електромагнітних хвиль. Електромагнітне випромінювання являє собою потік фотонів, який тільки при великій їх (фотонів) кількості можна розглядати як неперервний процес.

Розрізняють вимушені (під впливом зовнішніх джерел) і власні електромагнітні коливання. У необмеженому просторі або в системах з втратами енергії можливі електромагнітні коливання з неперервним спектром частот. Просторово обмежені системи мають дискретний спектр частот, причому кожній частоті відповідає один або кілька незалежних типів коливань (мод).

Подання коливань у вигляді суперпозиції мод з неперервним або дискретним спектром можливе для довільної складної системи провідників та діелектриків, якщо поля, струм або заряди в них пов'язані між собою лінійними співвідношеннями.

Електромагнітний спектр – спектр електромагнітного випромінювання.

Як спектральну характеристику електромагнітного випромінювання використовують такі величини:

- довжину хвилі;
- частоту коливань;
- енергію фотона (кванта електромагнітного поля).

Говорячи про довжину електромагнітних хвиль в середовищі, зазвичай мають на увазі еквівалентну величину довжини хвилі у вакуумі, яка відрізняється на коефіцієнт заломлення, оскільки частота хвилі при переході з одного середовища в інше зберігається, а довжина хвилі – змінюється.

У верхній частині шкали наводяться значення енергії (в електрон-вольтах). Частоти, зазначені в нижній частині шкали, виражені в герцах, а також у кратних одиницях:

1 кГц = 1000 Гц; 1 МГц = 1000 кГц = 1000000 Гц; 1 ГГц = 1000 МГц = 10⁹ Гц; 1 ТГц = 1000 ГГц = 10¹² Гц.

Шкала частот (довжин хвиль, енергій) є неперервною, але традиційно розбита на ряд діапазонів. Сусідні діапазони можуть трохи перекриватися.

*Під час підготовки до цієї теми необхідно розглянути **поняття**:*

– величини, які характеризують спектр електромагнітного випромінювання;

– гамма-випромінювання;

– рентгенівське випромінювання;

– ультрафіолетове випромінювання;

– оптичне випромінювання;

– інфрачервоне випромінювання;

– електромагнітне терагерцове випромінювання;

– електромагнітні мікро- і радіохвилі.

Рекомендована література

1. Пихтин А. Н. Физические основы квантовой электроники / Пихтин А. Н. – М. : Высш. шк., 1983. – 304 с.

2. Готра З. Ю. Фізичні основи електронної техніки / Готра З. Ю. – Львів : Бескид Біт, 2016. – 880 с.

ТЕМА 2. ОСОБЛИВОСТІ ОПТИЧНОГО ДІАПАЗОНУ

Мета: отримання знань щодо оптичного діапазону та його особливостей.

Випромінювання оптичного діапазону (видиме світло і близьке інфрачервоне випромінювання) вільно проходить крізь атмосферу, може бути легко відбите й заломлюється в оптичних системах. Джерела: теплове випромінювання (**і навіть** Сонця), флюоресценція, хімічні реакції, світлодіоди.

Кольори видимого випромінювання, відповідні монохроматичному випромінюванню, називаються спектральними.

Спектр і спектральні кольори можна побачити при проходженні вузького світлового променя через призму або будь-яке інше середовище, в якому заломлюються хвилі. Традиційно видимий спектр поділяється, **й собі**, на діапазони кольорів.

Ближнє інфрачервоне випромінювання займає діапазон від 207 ТГц (0,857 еВ) до 405 ТГц (1,68 еВ). Верхня межа визначається здатністю людського ока до сприйняття червоного світла, вона різна в різних людей. Як правило, прозорість в ближньому інфрачервоному випромінюванні відповідає прозорості у видимому світлі.

Під час підготовки до цієї теми необхідно розглянути **поняття**:

- швидкість світла;
- види оптики;
- світловий тиск.

Рекомендована література

1. Готра З. Ю. Фізичні основи електронної техніки / Готра З. Ю. – Львів : Бескид Біт, 2016. – 880 с.
2. Шимони В. А. Физическая электроника / Шимони В. А. – М. : Энергия, 2017. – 608 с.

ТЕМА 3. ІНВЕРСНА ЗАСЕЛЕНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РІВНІВ

Мета: отримання знань щодо енергетичних рівнів, їх заселеності та видів заселеності.

Для того, щоб середовище підсилювало збуджувальне випромінювання, необхідно створити нерівноважний стан системи з інверсною заселеністю рівнів. Інверсна заселеність рівнів (рис. 3.1) виникає тоді, коли число атомів у збудженому стані (рівень W_2) є більшим, ніж в основному стані (рівень W_1).

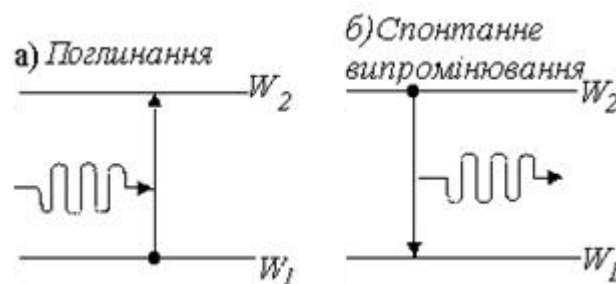


Рисунок 3.1 – Інверсна заселеність рівнів

Процес створення нерівноважного стану речовини з інверсною населеністю рівнів називають нагнітанням. Нагнітання може бути здійснене різними способами – оптичним, електричним, хімічним тощо.

У середовищах з інверсною заселеністю вимушене випромінювання може перевищити за інтенсивністю поглинутий світловий потік. Тоді світловий пучок, який падає на середовище, після його проходження буде підсилюватися (такі середовища називають активними). Все протікатиме так, ніби в законі Бугера $I = I_0 e^{-ax}$ коефіцієнт поглинання a став від'ємним.

*Під час підготовки до цієї теми необхідно розглянути **поняття**:*

- опис фізичних систем з інверсною заселеністю;
- накачка;
- створення інверсної заселеності.

Рекомендована література

1. Шимони В. А. Физическая электроника / Шимони В. А. – М. : Энергия, 2017. – 608 с.
2. Соболев В. Д. Физические основы электронной техники / Соболев В. Д. – М. : Высш. шк., 1979. – 448 с.

ТЕМА 4. ВИПРОМІНЮВАЛЬНІ ТА БЕЗВИПРОМІНЮВАЛЬНІ КВАНТОВІ ПЕРЕХОДИ

Мета: отримання знань щодо квантових переходів, їх видів, а саме випромінювальних та безвипромінювальних квантових переходів.

Квантові переходи – стрибкоподібні переходи квантової системи (атома, молекули, атомного ядра, твердого тіла) з одного стану в інший.

Випромінювальні квантові переходи можуть бути спонтанними («мимовільними»), не залежними від зовнішніх впливів на квантову систему (спонтанне випускання фотона), і вимушеними, індукованими – під дією зовнішнього електромагнітного випромінювання резонансної частоти (поглинання і вимушене випускання фотона). Оскільки спонтанне випускання можливо, квантова система знаходиться на збудженому рівні енергії деякий **скінченний** час, а потім стрибкоподібно переходить на який-небудь більш низький рівень. Середня тривалість перебування системи на

збудженому рівні називається часом життя на рівні. Чим менша тривалість, тим більше вірогідність переходу системи в стан з нижчою енергією.

Безвипромінювальні квантові переходи також характеризуються вірогідністю відповідних переходів – середніми числами процесів віддачі і отримання енергії за 1 с, розраховані на одну частку з енергією. Якщо можливі як випромінювальні, так і безвипромінювальні квантові переходи, то повна вірогідність переходу дорівнює сумі вірогідностей переходів обох типів. Врахування безвипромінювальних квантових переходів відіграє істотну роль, коли їх вірогідність того ж порядку або більша вірогідності відповідних квантових переходів з випромінюванням.

Під час підготовки до цієї теми необхідно розглянути поняття:

- квантові переходи;
- випромінювальні квантові переходи;
- безвипромінювальні квантові переходи.

Рекомендована література

1. Соколов В. Д. Физические основы электронной техники / Соколов В. Д. – М. : Высш. шк., 1979. – 448 с.

2. Ахиезер А. И. Атомная физика / Ахиезер А. И. – К. : Наукова думка, 1983. – 304 с.

ТЕМА 5. МАГНЕТОН БОРА

Мета: отримання знань щодо магнетона Бора.

Магнетон Бора – фізична величина, яка визначає вклад взаємодії з магнітним полем в енергію квантово-механічної частки. Визначається за допомогою формули

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m},$$

де e – заряд частки, \hbar – приведена стала Планка, m – маса частки.

Магнетон Бора є найменшим значенням магнітного моменту атома або «квантом» магнітного моменту. Ця величина взята за одиницю вимірювання магнітного моменту в атомних системах; це дозволяє

стверджувати, що орбітальний магнітний момент атома і його проекція змінюються дискретно.

*Під час підготовки до цієї теми необхідно розглянути **поняття**:*

- магнетон Бора;
- ядерний магнетон.

Рекомендована література

1. Ахиезер А. И. Атомная фізика / Ахиезер А. И. – К. : Наукова думка, 1983. – 304 с.
2. Байбородин Ю. В. Основы лазерной техники / Байбородин Ю. В. – К. : Вища школа, 1981. – 408 с.

ТЕМА 6. КВАНТ КОЛИВАННЯ КРИСТАЛІЧНОЇ ГРАТКИ

Мета: отримання знань щодо кванта коливання кристалічної ґратки.

Теплові коливання атомів у кристалах – це складні гармонічні коливання зв'язаної системи частинок. Для більшості кристалів амплітуда теплових коливань невелика, вона не перевищує 5–10% міжатомної відстані. Тому в першому наближенні такі коливання можна вважати гармонічними і на цій підставі пояснити теплоємність, пружні та оптичні властивості твердого тіла. Проте в основі пояснення теплового розширення твердого тіла та деяких квантово-механічних явищ є гармонічність коливань структурних елементів ґратки.

Оскільки ґратка – це зв'язана коливальна система, то коливання кожного структурного елемента призводять до утворення в кристалі хвилі, яка з великою швидкістю поширюється від частинки до частинки. Ці коливання у кристалах з кубічною симетрією є двох типів: акустичні й оптичні. Якщо молекули кристала коливаються як одне ціле, тобто сусідні частинки рухаються в одному напрямі, в кристалі виникають флуктуації густини речовини. Хвилі, спричинені такими коливаннями, називають акустичними (пружними). У молекулярних кристалах сусідні іони різних знаків можуть рухатися у протилежних напрямках, що спричинює утворення флуктуації електричного поля, тобто електромагнітної хвилі. Це оптичні хвилі. Отже, будь-яка хвиля, яка поширюється в молекулярному кристалі, матиме коливання як акустичного, так і оптичного типу.

За аналогією з електромагнітною хвилею, де кожній електромагнітній хвилі відповідає потік фотонів, кожній пружній біжучій хвилі в кристалі можна поставити у відповідність сукупність рухомих квазічастинок – фононів, які ніби атоми ідеального газу заповнюють увесь об'єм тіла. Вони рухаються в кристалі, взаємодіють між собою, розсіюються. Самі фонони, кожен зокрема, можуть мати різну енергію, сумарна енергія фононів дорівнює енергії всієї ґратки.

*Під час підготовки до цієї теми необхідно розглянути **поняття**:*

- кристалічна ґратка;
- фонони;
- квант.

Рекомендована література

1. Байбородин Ю. В. Основы лазерной техники / Байбородин Ю. В. – К. : Вища школа, 1981. – 408 с.
2. Иродов И. Е. Задачи по квантовой физике / Иродов И. Е. – М. : Высш. шк., 1991. – 175 с.

ТЕМА 7. ДОБРОТНІСТЬ СПЕКТРАЛЬНИХ ЛІНІЙ

Мета: отримання знань щодо добротності спектральних ліній.

Окрім енергетичних, лазерне випромінювання **має набір** спектрально-просторових характеристик і параметрів, визначених властивостями оптичного резонатора.

Будь-який резонатор можна розглядати як коливальну систему, в якій можливе накопичення енергії електромагнітних коливань.

Здатність резонатора зберігати накопичену енергію характеризується величиною його добротності Q – інтегральною характеристикою, що визначається відношенням енергії $W_{\text{нак}}$, **накопиченої** резонатором, до енергії, що втрачається ним за період $W_{\text{вит}}$:

$$Q = 2\pi \frac{W_{\text{нак}}}{W_{\text{вит}}}.$$

Наприклад, втрати енергії в коливальному контурі – простому електромагнітному резонаторі – складаються з теплових втрат в його елементах і втрат на випромінювання в навколишньому просторі.

*Під час підготовки до цієї теми необхідно розглянути **поняття**:*

- резонатор;
- мода.

Рекомендована література

1. Иродов И. Е. Задачи по квантовой физике / Иродов И. Е. – М. : Высш. шк., 1991. – 175 с.
2. Жмурко О. І. Збірник задач з електроніки / О. І. Жмурко, Є. О. Смольков. – Вінниця : ВДТУ, 2003. – 131 с.

ТЕМА 8. КВАНТУВАННЯ ЕНЕРГІЙ ДВОХАТОМНОЇ МОЛЕКУЛИ

Мета: отримання знань щодо квантування енергій двохатомної молекули.

Молекули складаються з однакових або різних атомів, **з'єднаних** між собою в одне ціле міжатомними зв'язками. Існування молекул як стійких систем показує, що хімічні зв'язки атомів у молекулах **мають** бути зумовлені наявністю між атомами деяких сил взаємодії, які **«зв'язують»** атоми в молекулах. Для роз'єднання молекули на атоми **потрібно** виконати певну роботу. Це підтверджує факт виділення енергії при утворенні молекули. Так, наприклад, два атоми водню у вільному стані мають більшу енергію, ніж ті самі атоми, **об'єднані** у двохатомну молекулу. Це є доказом наявності сил, які «зв'язують» атоми в молекулах, причому енергія, яка виділяється при утворенні молекули, є мірою тих сил взаємодії.

Експерименти показують, що сили міжатомної взаємодії в молекулах виникають між зовнішніми, валентними електронами атомів. Про це свідчить різка зміна оптичного спектра атомів при утворенні ними молекул і, навпаки, збереження особливостей рентгенівського характеристичного спектра атомів незалежно від того, вільні атоми чи утворюють молекулярні сполуки.

Важливо відмітити, що атоми на значних відстанях не взаємодіють один з одним. Із зменшенням відстані r між ядрами атомів зростають сили взаємного притягання. Проте ці сили не єдині. На малих відстанях між атомами виникають сили взаємного відштовхування, величина яких різко зростає в момент перекриття електронних оболонок. Сили відштовхування

більш короткої дії, ніж сили притягання. На рис. 8.1 наведено криві залежності від відстані r сил притягання F_2 , відштовхування F_1 і результуючої сили F взаємодії атомів у такій молекулі, причому сили відштовхування вважаються додатними.

Внаслідок протилежної дії сил F_1 і F_2 на деякій відстані r_0 між атомами обидві сили врівноважуються і їхня геометрична сума стає рівною нулю.

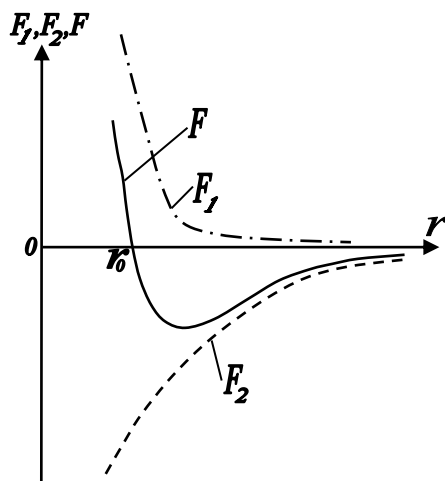


Рисунок 8.1 – Криві залежності від відстані r сил притягання F_2 , відштовхування F_1 і результуючої сили F взаємодії атомів

На цій відстані взаємна потенціальна енергія $W(r)$ атомів двохатомної молекули найменша. На рис. 8.2 зображено криву залежності від r потенціальної енергії $W_p(r)$ взаємодії двох атомів у молекулі.

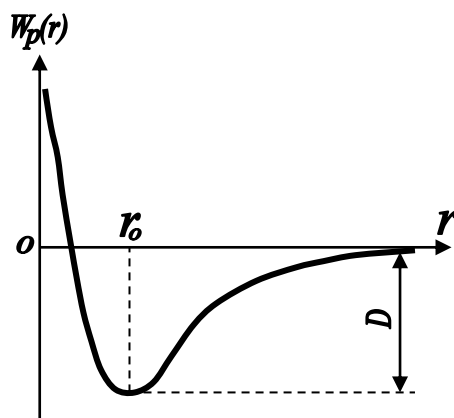


Рисунок 8.2 – Крива залежності від r потенціальної енергії $W_p(r)$ взаємодії двох атомів

Величина D (рис. 8.2) чисельно дорівнює роботі, яку потрібно виконати, щоб розірвати зв'язки атомів у молекулі, тобто роз'єднати молекулу на атоми. Цю роботу ще називають енергією дисоціації молекули або енергією зв'язку.

*Під час підготовки до цієї теми необхідно розглянути **поняття**:*

- взаємодія атомів;
- іонний і ковалентний зв'язок атомів у молекулах;
- теорія обмінних сил.

Рекомендована література

1. Жмурко О. І. Збірник задач з електроніки / О. І. Жмурко, Є. О. Смольков. – Вінниця : ВДТУ, 2003. – 131 с.
2. Успенский А. В. Сборник задач по квантовой электронике / Успенский А. В. – М. : Высш. шк., 1976. – 176 с.

Тестові завдання

1. Що розуміють під поняттям абляція?

- (?) загибель живої тканини;
- (!) процес ліквідації живої тканини під дією лазерного випромінювання високої енергії;
- (?) процес ліквідації живої тканини під дією лазерного випромінювання низької енергії;
- (?) процес ушкодження живої тканини під дією лазерного випромінювання високої енергії.

2. Який із варіантів відповідає другому механізму абляції?

- (?) опромінення тканин імпульсними лазерами в ультрафіолетовій ділянці спектра;
- (?) опромінення біологічних тканин променями Nd:YAG лазера (1064 нм);
- (?) опромінення, в основному, твердих тканин імпульсами інфрачервоного лазера;
- (!) опромінення м'яких тканин, що містять воду, інфрачервоним лазером.

3. Якому із механізмів абляції відповідає використання лазера в ультрафіолетовому спектрі?

- (?) перший механізм;
- (?) другий механізм;
- (?) третій механізм;
- (!) четвертий механізм.

4. Яка із перерахованих матриць має синій колір випромінювання?

- (?) «Барва-Флекс/Г»;
- (!) «Барва-Флекс/С»;
- (?) «Барва-Флекс/К»;
- (?) «Барва-Флекс/Ф».

5. Яка частота змінної напруги живлення спеціалізованого блока живлення?

- (!) 50 Гц;
- (?) 40 Гц;
- (?) 60 Гц;
- (?) 70 Гц.

6. Яка втрата енергії притаманна гнучким кварцовим світловодам?

- (!) не перевищує 2–5 %;
- (?) не перевищує 5–7 %;
- (?) не перевищує 10 %;
- (?) не перевищує 15 %.

7. Які частини тіла найбільше страждають при **недотриманні** техніки безпеки медичним персоналом під час використання лазерів?

- (?) слизисті оболонки дихальних шляхів;
- (?) шкіра;
- (!) очі;
- (?) нервова система.

8. Випромінювання в якому діапазоні органи зору сприймають з найбільшою чутливістю?

- (!) 400–500 нм;
- (?) 500–700 нм;
- (?) 300–400 нм;
- (?) 300–700 нм.

9. З якою метою в операційній максимально обмежуються дзеркальні поверхні?

- (!) віддзеркалене проміння небезпечне для людей;
- (?) віддзеркалене проміння створює завади в роботі приладів;
- (?) віддзеркалене проміння створює завади для персоналу;
- (?) віддзеркалене проміння небезпечне для приладів.

10. **За рахунок чого забезпечується** широка сфера застосування лазерних апаратів «Ланцет-1» і «Ланцет-2»?

- (?) високої точності роботи;
- (?) високої надійності;
- (!) змінних насадок;
- (?) ціни.

Навчальне видання

Методичні вказівки
до виконання самостійної роботи
з дисципліни «Електронні прилади та пристрої квантової
електроніки»
для студентів спеціальності
171 – «Електроніка»

Укладач Богдан Петрович Книш

Рукопис оформив Б. Книш

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет виготовив О. Ткачук

Підписано до друку __.__.2020 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. __,__.
Наклад 40 (1-й запуск 1–21) пр. Зам. № 2020-__.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.