



Національна академія наук України  
Інститут проблем матеріалознавства  
ім. І.М. Францевича



Силабус (робоча програма) навчальної дисципліни  
**КОЛИВНА СПЕКТРОСКОПІЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ**  
**VIBRATIONAL SPECTROSCOPY OF NANOMATERIALS**

**Реквізити навчальної дисципліни**

<b>Рівень вищої освіти</b>	<i>третій (освітньо-науковий)</i>
<b>Галузь знань</b>	<i>10 «Природничі науки»</i>
<b>Спеціальність</b>	<i>105 «Прикладна фізика та наноматеріали»</i>
<b>Освітня програма</b>	<i>105 «Прикладна фізика та наноматеріали»</i>
<b>Статус дисципліни</b>	вибіркова
<b>Форма навчання</b>	денна (очна), он-лайн/офф-лайн
<b>Рік підготовки, семестр</b>	2 курс навчання, 4 семестр
<b>Обсяг дисципліни</b>	3 кредити ECTS, 90 годин
<b>Семестровий контроль/ контрольні заходи</b>	залік
<b>Розклад занять</b>	<i>лекція – раз на тиждень (32 години); практика/семінар/консультації – 1 раз на два тижні (16 годин); самостійна робота 41 год., у тому числі на виконання індивідуальних/домашніх завдань 20 год, залік – 1 год</i>
<b>Мова викладання</b>	українська
<b>Інформація про викладачів</b>	<i>д.ф.-м.н., проф., ст. н.с. Стрельчук Віктор Васильович, тел.: +38 093 922 61 78, e-mail: <a href="mailto:viktor.strelchuk@ccu-semicond.net">viktor.strelchuk@ccu-semicond.net</a></i>
<b>Розміщення курсу</b>	Google Classroom; доступ за запрошенням викладача

**Програма навчальної дисципліни**

**1. Опис освітньої компоненти, її мета, предмет вивчення та результати навчання**

*Метою навчальної дисципліни є придбання молодими фахівцями знань про фізичні явища та основи теоретичного опису процесів, що відбуваються при взаємодії оптичного випромінювання з наноструктурованими матеріалами. Отримання практичних навичок використання сучасних експериментальних оптичних методів коливної спектроскопії для дослідження елементарних збуджень (електрони, фонони,*

плазмони, поляритони, екситони) в твердих тілах і наноструктурах для вирішення поставлених завдань в галузі фізики твердого тіла, фізичного матеріалознавства, високих технологій і т.д.

**Предмет освітньої компоненти** – типи кристалічних твердих тіл та наноструктур, фізична будова електронної та коливної підсистем, коливні властивості кристалів і наноструктур, елементарні збудження і типи взаємодій між ними.

**Метою освітньої компоненти** є формування у здобувачів вищої освіти (з.в.о.) рівня PhD компетентностей:

Інтегральна компетентність:

Здатність продукувати нові ідеї, розв'язувати комплексні проблеми професійної та/або дослідницько-інноваційної діяльності у сфері прикладної фізики та наноматеріалів, застосовувати методологію наукової та педагогічної діяльності, проводити власне наукове дослідження, результати якого мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення.

Загальні компетентності:

ЗК01. Здатність до освоєння і системного аналізу через наукове сприйняття і критичне осмислення нових знань.

ЗК02. Здатність до критичного аналізу і креативного синтезу нових ідей.

ЗК03. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

ЗК04. Здатність до оприлюднення наукових результатів перед академічною аудиторією та громадськістю як на національному, так і на міжнародному рівні.

ЗК07. Здатність дотримуватися етичних норм та авторського права при проведенні наукових досліджень, діяти на основі принципів академічної доброчесності, а також ставитися із повагою до національних та культурних традицій, способів роботи і мислення інших.

Фахові компетентності:

ФК01. Здатність самостійно здійснювати наукову діяльність у галузі прикладної фізики з використанням новітніх наукових теорій, методів та інноваційних технологій.

ФК02. Здатність розвивати теоретичні засади, створювати і застосовувати сучасні об'єкти і процеси прикладної фізики та наноматеріалів.

ФК03. Здатність розв'язувати комплексні проблеми в галузі прикладної фізики та наноматеріалів з урахуванням міжгалузевих зв'язків для забезпечення потреб у високоефективних матеріалах, енерго- та ресурсозберігаючих технологіях.

ФК05. Спроможність спілкуватись в галузі прикладної фізики та наноматеріалів в діалоговому режимі в різномовному середовищі для ефективного публічного представлення та захисту отриманих наукових результатів на вітчизняних та міжнародних наукових форумах, конференціях і семінарах.

ФК07. Соціальна відповідальність за результати прийняття стратегічних технічних рішень і впровадження нових технологій і матеріалів з огляду на їх вплив на навколишнє середовище.

ФК08. Здатність до постійного самовдосконалення у професійній сфері, відповідальність за навчання інших при проведенні науково-педагогічної діяльності та наукових досліджень в галузі прикладної фізики та наноматеріалів.

**Програмні результати навчання.** Після засвоєння освітньої компоненти аспіранти мають продемонструвати такі результати навчання:

PH01. Проявляти наукові погляди та підходи при оцінюванні варіантів створення нових перспективних матеріалів з заданим рівнем властивостей.

PH02. Володіти концептуальними та методологічними знаннями в галузі прикладної фізики та наноматеріалів бути здатним застосовувати їх до професійної діяльності на межі предметних галузей.

PH03. Інтегрувати існуючі методики та методи досліджень та адаптувати їх для розв'язання наукових завдань при проведенні дисертаційних досліджень.

PH07. Визначатись з факторами та критеріями, які необхідно враховувати при експертизі науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт та проєктів в галузі прикладної фізики та наноматеріалів враховуючи технологічний, економічний, соціальний ефект та вплив на стан довкілля.

PH09. Застосовувати у науковій та практичній діяльності провідні тенденції, ключові напрями та перспективи розробки нових матеріалів різної природи, основи сучасних технологій виготовлення конструкційних і функціональних матеріалів, «розумних» та біо-матеріалів, матеріалів спеціального (оборонного) призначення, з подовженим строком експлуатації та для відновлюваних джерел енергії.

PH12. Демонструвати навички роботи з сучасним обладнанням при проведенні експериментальних досліджень з прикладної фізики та наноматеріалів.

PH18. Дотримуватись етичних норм, враховувати авторське право та норми академічної доброчесності при проведенні наукових досліджень, презентації їх результатів та у науково-педагогічній діяльності.

## **2. Місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою**

Перелік освітніх компонент, знань та умінь, володіння якими необхідні аспіранту для успішного засвоєння освітньої компоненти:

<b>Пререквізити:</b>	
Основи фізики конденсованого стану речовини	Основи фізики конденсованого стану речовини як міждисциплінарної галузі науки, що вивчає залежність між складом, структурою та електро-фізичними властивостями матеріалів.
Фізичні основи наноматеріалів та нанотехнологій	Теоретичні основи будови, властивостей і методів отримання наноструктур і наноструктурних матеріалів, достатні для самостійного подальшого проведення досліджень в цієї галузі і наступного оволодіння нанотехнологіями, та вміння вибирати методи синтезу (отримання) наноструктур, консолідації тривимірних матеріалів, отримання тонких плівок, адаптувати знання при виконанні власних дисертаційних досліджень.
Науково-дослідна практика	Знання з технології та інженерії, а також дослідницькі навички, достатні для проведення досліджень з відповідного напрямку.
<b>Постреквізити:</b>	
Наукова складова	Планування і виконання експериментальних досліджень з використанням сучасних методів та методик дослідження,

### 3. Зміст освітньої компоненти

#### **Тема 1. Теоретичні основи коливної спектроскопії твердотільних функціональних матеріалів.**

Коливні спектри кристалів. Класичний і квантовомеханічний підхід для опису коливних спектрів. Коливання кристалічної ґратки. Коливання і хвилі в лінійному одновимірному періодичному ланцюжку з атомами одного або двох типів. Закон дисперсії для коливань одновимірного періодичного ланцюжка. Коливання атомів тривимірної ґратки. Нормальні координати кристалічної ґратки. Кінетична і потенціальна енергія коливань атомів. Фонони. Історія відкриття фонона. Фонони в кубічних кристалах. Кубічна структура. Іонний зв'язок в полярних кристалах. Ґратки Браве. Параметри Вейса. Індeksi Мюллера. Елементи симетрії кристалічних структур. Коливання в полярних кубічних кристалах. Фонони в кристалах з вюрцитною кристалічною ґраткою. Модель Лоудона для одноосних кристалів і її застосування до нітридів АЗВ5 групи.

#### **Тема 2. Методи коливної спектроскопії**

Фізичні основи комбінаційного розсіяння світла (КРС). Макроскопічна (класична) та мікроскопічна теорія КРС. Спектроскопія КРС – ефективний засіб вивчення взаємодії випромінювання з речовиною. Фізичні основи вимушеного і когерентного антистоксового комбінаційного розсіяння світла (ВКР і КАРС). ВКР – лазери. Сучасні досягнення КАРС-спектроскопії в дослідженні розподілу молекул по коливально-обертальним рівням. Застосування ВКР і КАРС в біології і медичній діагностиці. Розсіяння на акустичних фононах (Мандельштама-Бріллюена). Фр'юлівська електрон-фононна взаємодія в полярних кристалах. Правила відбору. Приклади. Алмаз, кремній і германій. Сучасні КРС-спектрометри. Макро і конфокальна КРС-спектроскопія. Основні компоненти і технічні характеристики КРС-спектрометрів. Роздільна здатність; дисперсія; світлосила. Джерела світла. Детектори. Техніка експерименту. Конфігурація експерименту КРС. Поляризаційні вимірювання. Позначення Порто. Приклади спектрів КРС.

Інфрачервона спектроскопія: спектри поглинання (фононні процеси). Зонна структура. Механізми поглинання світла в напівпровідниках. Край поглинання у прямозонних і непрямозонних напівпровідниках. Край Урбаха. Ефект Бурштейна-Мосса для невироджених напівпровідників. Однофононне поглинання у полярних напівпровідниках. LO-TO розчеплення. Метод Берремана. Фононні спектри змішаних напівпровідників. Локальні коливання домішок. ІЧ спектроскопія молекулярних коливань. Типи молекулярних коливань.

#### **Тема 3. Симетрія кристалічної ґратки і фонони. Ангармонізм.**

Тензор комбінаційне розсіяння світла і правила відбору. Тензор розсіяння. Правила відбору. Затухання фононів (ангармонізм). Алмаз. Графіт. Фонони структури типу цинкової обманки (GaAs). Деформаційний потенціал. Фр'юлівська взаємодія в полярних кристалах. Фононний спектр вюрцитної структури (w-GaN). Фононні спектри КРС твердих розчинів напівпровідників. Одно-, двох і трьохмодовий тип перебудови фононного спектру. Політипи карбїду кремнію і їх фононні спектри.

#### **Тема 4. Резонансне і електронне комбінаційне розсіяння світла**

Резонансне комбінаційне розсіяння світла в кристалах. Вхідний, вихідний резонанс. Багатофононне резонансне КРС і електрон-фононна взаємодія. Комбінаційне розсіяння на змішаних LO фонон-плазмових збудженнях. Механізми розсіяння: деформаційний потенціал і електронно-оптичний механізм, механізм флуктуації зарядової густини та незбереження хвильового вектора. Вільні носії заряду і домішки. Електронне КРС. КРС на магнонах.

#### **Тема 5. Коливні властивості наноструктур**

Розмірно-обмежені 3D, 2D, 1D, 0D кристалічні середовища. Дискретність хвильового вектору. Квантово-розмірні ефекти - квантування енергії електронів, фононів. Двомірна квантова яма, одномірна квантова нитка і нульмірна квантова точка. Надгратки. Фонони в надгратках. Наближення пружного континуума. Раманівське розсіяння на складених (folding phonons) акустичних фононах. Конфаймент фононів. Раманівське розсіяння на квантованих конфайментних оптичних фононах (Confinement modes). Раманівське розсіяння на інтерфейсних модах (Interface modes). Фонони в нанокристалах. Модель пружного континуума. Низькочастотна "дихаюча" мода - Лембовська мода. Модель механічного континуума (модель Ріхтера). Конфайментні оптичні моди. Модель діелектричного континуума. Інтерфейсні (поверхневі) оптичні моди. Розрахунки коливних спектрів нанокристалів. Коливні властивості вуглецевих наноструктур. Структурні форми елементарного вуглецю з різним координаційним числом і дальністю впорядкування. Фононні спектри алмазу, графіту, графену, фуллеренів, вуглецевих нанотрубок, аморфного вуглецю, склоподібного графіту, сажі.

#### **Тема 6. Раманівська мікроспектроскопія**

Субмікронна спектроскопія мікро-КРС. Конфокальна спектроскопія і спектроскопія ближнього поля. Мікрокартографування деформацій в полікристалічних алмазних плівках. Підсилена поверхнею спектроскопія КРС (SERS). TERS-спектроскопія. Застосування. Досягнення і перспективи сучасних КРС-спектрометрів.

#### **4. Навчальні матеріали та ресурси**

Навчальні матеріали, зазначені нижче, доступні у бібліотеці інституту, а також може бути надана в електронному вигляді. Обов'язковою до вивчення є базова література, інші матеріали – факультативні.

##### **Базова література:**

1. *Light Scattering in Solids V. Superlattice and the microstructures.* Ed. By V.Cardona and G.Guntherodt.- Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989, 211 p.
2. *Light Scattering in Solids VIII. Fullerenes, Semiconductor Surface, Coherent Phonons.* Ed. By V.Cardona and G.Guntherodt.- Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000, 220 p.
3. *Light Scattering in Solids IX. Novel Materials and Techniques.* Ed. by V.Cardona and G.Guntherodt.- Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007, 422p.

4. W.H. Weber, R. Merlin. *Raman Scattering in Materials Science*. - Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000, 492 p. *Спектроскопия комбинационного рассеяния света в газах и жидкостях (Под.ред. А.Вебера) М.: Мир , 1882, 373 с.*
5. A. Fadini, F.-M. Shnepel. *Vibrational Spectroscopy: Methods and Applications*. Ellis Horwood Ltd, Chichester, 1989.
6. Even Smith, Geoffrey Dent. *Modern Raman Spectroscopy – A practical approach*. - John Willey&Sons, Ltd, 2005, 225 с.
7. R.L. McCreery. *Raman Spectroscopy for Chemical Analysis*. John Willey&Sons, Inc., New York, 2000.
8. Corle T.R., Kino G.S. *Confocal Scanning Optical Microscope and Related Imaging Systems*.- Academ. pres., San Diego, London, Boston, 2000, 331 p.
9. W.H.Weber, R.Merlin. *Raman Scattering in Materials Science*. - SpringerVerlag, Berlin, Heidelberg, 2000, 492 p.

**Додаткова література:**

1. M. Burghard. *Electronic and vibrational properties of chemically modified single-well carbon nanotubes*. *Surface Science Reports* 58 (2005) p. 1-109.
2. D. Bimberg, M. Grundman, N.N. Ledentsov. *Quantum dot heterostructures*. NY: J. Wiley, 1999.
3. A. Ievtushenko, V. Karpyna, L. Myroniuk, D. Myroniuk, L. Petrosian, O. Olifan, O. Kolomys, V. Strelchuk *Effect of magnesium doping on the structure, optical properties and photocatalytic efficiency of ZnO nanostructures deposited by atmospheric pressure MOCVD*//*Chemical Physics Letters*. - 2024. - Vol. 857 - P. 141720 (6 pp). <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2024.141720>.
4. V. Karpyna, L. Myroniuk, D. Myroniuk, O. Bykov, O. Olifan, O. Kolomys, V. Strelchuk, M. Bugaiova, I. Kovalchuk, A. Ievtushenko, *Effect of Cobalt Doping on Structural, Optical, and Photocatalytic Properties of ZnO Nanostructures* // *Catalysis Letters*. - 2024. - 154. – P. 2503–2512. <https://doi.org/10.1007/s10562-023-04493-x>
5. A.I. Ievtushenko, V.A. Karpyna, O.I. Bykov, M.V. Dranchuk, O.F. Kolomys, D.M. Maziar, V.V. Strelchuk, S.P. Starik, V.A. Baturin, O.Y. Karpenko, O.S. Lytvyn *The influence of substrate temperature on the structure and optical properties of NiO thin films deposited using the magnetron sputtering in the layer-by-layer growth regime* // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. - 2023. - V. 26, No 4. - P. 398-407. <https://doi.org/10.15407/spqeo26.04.398>
6. V.V. Strelchuk, O.F. Kolomys, D.M. Maziar, V.P. Melnik, B.M. Romanyuk, O.Y. Gudymenko, O.V. Dubikovskiy, O.I. Liubchenko. *Effect of structural disorder on the modification of V–V and V–O bond lengths at the metal-dielectric phase transition in VO<sub>2</sub> thin films*. *Materials Science in Semiconductor Processing*.- 2024.- V.174.- 108224 <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108224>
7. A.S. Nikolenko, V.V. Strelchuk, Y.Y. Kudryk, I.M. Danylenko, A.E. Belyaev, *Peculiarities of current transport in boron-doped diamond Schottky diodes with hysteresis in current–voltage characteristics*//*Diamond and Related Materials*.-2024.-V.143.- 110897-110904. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.110897>
8. AV Vasin, AV Rusavsky, SV Mamykin, AS Nikolenko, VV Strelchuk / *On the nature of*

*doping effect of methane in ZnO thin films deposited by RF-magnetron sputtering // Journal of Materials Science: Materials in Electronics.- 2022.- V.33,№9.- 6421-6431.*

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-022-07814-9>

9. A Nikolenko, V Strelchuk, O Gnatyuk, P Kraszkievycz, V Boiko, E Kovalska / *In situ Raman study of laser-induced stabilization of reduced nanoceria (CeO<sub>2-x</sub>) supported on graphene // Journal of Raman Spectroscopy.- 2019.- V. 50, №4.- 490-498.*

<https://doi.org/10.1002/jrs.5542>

## Навчальний контент

### 5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

*Передбачено комплексний підхід, що поєднує лекції та семінари, а також розгляд питань, що виносяться на самостійну роботу. При читанні лекцій застосовується ілюстративний матеріал у вигляді презентацій, які розміщені в Google Classroom. Після кожної лекції рекомендується ознайомитись з матеріалами, рекомендованими для самостійного вивчення, а перед наступною лекцією – повторити матеріал попередньої. Метою практичних занять є закріплення теоретичних знань, отриманих на лекціях та в процесі самостійної роботи з літературними джерелами в ході вивчення освітньої компоненти.*

### 6. Самостійна робота

*Самостійна робота включає повторення лекційного матеріалу, опрацювання рекомендованої літератури, що дозволяє розширити та поглибити знання з дисципліни, підготовку до практичних завдань та заліку.*

## Політика та контроль

### 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

*Відвідування лекційних та семінарських занять, які можуть проводитись як он-лайн, так і офф-лайн, є обов'язковим. У випадку відсутності на занятті аспіранти зобов'язані повідомити викладача заздалегідь і надати документальне підтвердження причини відсутності, якщо це можливо. На початку кожної лекції проводиться опитування за матеріалами попередньої лекції із застосуванням інтерактивних засобів з метою визначення рівня обізнаності здобувачів за даною темою та підвищення зацікавленості. Під час сигналу повітряної тривоги заняття негайно припиняється, а всі учасники навчального процесу повинні пройти в найближче укриття. Для завершення заняття організується додатковий час.*

*Правила призначення заохочувальних та штрафних балів. Заохочувальні бали можуть нараховуватись викладачем за активну участь у заняттях, виконання творчих робіт з освітньої компоненти або додаткового проходження он-лайн профільних курсів з отриманням відповідного сертифікату. Але їх сума не може перевищувати 25% від рейтингової шкали. Штрафні бали в рамках освітньої програми не передбачені.*

*Політика дедлайнів та перескладань. Дедлайни здачі завдань та контрольних робіт є обов'язковими. У разі поважних причин, аспіранти можуть звернутись до викладача для можливої зміни продовження термінів. Запити на продовження дедлайну повинні бути подані заздалегідь.*

## 8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

В рамках навчальної дисципліни передбачено кілька видів контролю та систему рейтингування результатів навчання, а саме:

Поточний контроль: опитування під час лекцій та на семінарських заняттях.

Семестровий контроль: залік.

Рейтингова система оцінювання формується з суми балів, набраних під час поточного та семестрового контролю. Рейтинг аспіранта  $R$  розраховується за 100 бальною шкалою та складається з балів, що він отримує протягом семестру (стартовий рейтинг)  $S$  та диференційованого заліку  $C$ . Додаткові бали  $D$  можна отримати за активну участь у заняттях, виконання творчих робіт з освітньої компоненти або додаткового проходження он-лайн профільних курсів з отриманням відповідного сертифікату. Таким чином, сумарний рейтинговий бал розраховується як

$$R=S + C + D$$

Стартовий рейтинг  $S$  складається з балів, що аспірант отримує за відвідування занять (1 бал), правильну відповідь при поточному опитуванні (2 бали), виконання творчого завдання (5 балів). Максимальна сума балів, яку аспірант може набрати протягом семестру (стартовий рейтинг), складає 50 балів. Умовою допуску до заліку є кількість рейтингових балів не менше 30.

На заліку аспіранти виконують письмову тестову роботу, що складається з 5 питань. Кожне запитання (завдання) оцінюється в 10 балів. Умовою успішної здачі заліку є кількість отриманих за залікову роботу балів не менше 30.

Сумарний рейтинговий бал розраховується за формулою:

$$R=S + C + D,$$

де  $S$  – стартовий рейтинг;

$C$  – залік;

$D$  – додаткові бали.

Відповідність між кількістю балів, оцінкою за національною шкалою та шкалою ECTS наведена в таблиці.

Кількість балів	Шкала ECTS	Оцінка за національною шкалою
90-100	A	Відмінно
85-89	B	Добре
75-84	C	
65-74	D	
60-64	E	Задовільно
Менше 60	FX	Незадовільно
Не виконані умови допуску		Не допущено

## 9. Додаткова інформація з освітньої компоненти

Робочу програму освітньої компоненти (силабус):

**Складено** д.ф.-м.н., проф., ст.н.с. Стрельчук Віктор Васильович

**Ухвалено** Вченою радою Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Національної академії наук України (протокол №10 від «06» серпня 2024 р.).