

УДК 53(075.8)

Венгер Є.Ф., Мельничук Л.Ю., Мельничук О.В.

## ЗАСТОСУВАННЯ НАУКОВОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ З ІЧ-СПЕКТРОСКОПІЇ

*У роботі продемонстровано практичну цінність лабораторного практикуму на основі неруйнівного методу зовнішнього ІЧ-відбивання і показано доцільність та ефективність використання отриманих знань та навичок як у навчальному процесі, так і на виробництві.*

**Ключові слова:** спектр відбивання, карбід кремнію, комп'ютерне моделювання, науково-дослідна робота.

На сьогодні фахівець з вищою технічною освітою – це інженер, учений або керівник, який розробляє, проводить модернізацію існуючих та запроваджує сучасні науково-дослідні комплекси в своїй професійній діяльності [1–4]. Ефективність цього процесу залежить від рівня його підготовки і широти кругозору. Саме тому підготовка висококваліфікованих спеціалістів за спеціальністю "Прикладна фізика та наноматеріали" немислима без постійного удосконалення як фахових теоретичних знань з дисциплін в галузі природничих наук – фізики, хімії та математики, так і набуття практичних навичок у проведенні експериментальних досліджень у ВНЗ та на виробництві. Першочергове місце у ВНЗ належить організації фундаментальної підготовки фахівців-магістрів. Якісна освіта – це, насамперед, узгоджені міждисциплінарні зв'язки між теоретичними курсами з фізики та математики. На кожній навчальній ланці, починаючи з лекцій, практичних та семінарських занять, магістр повинен отримувати багаж знань у доступній, наочній, а головне, логічно зрозумілій формі. З іншого боку, у зв'язку із стрімким розвитком приладобудування, що базується на досягненнях в сфері опто- та наноелектроніки, постає об'єктивна потреба в підготовці нових висококваліфікованих кадрів, і особливо інженерно-технічного персоналу, який зуміє поєднати теоретичну підготовку з експериментальними дослідженнями на сучасному обладнанні [4, 5]. Тут важливим елементом у підготовці спеціаліста є використання в навчальному процесі сучасного наукового обладнання та забезпечення кожного магістра якісними методичними матеріалами, особливо інструкціями при роботі з високовартісними приладами. Безперечно, складно підготувати універсального фахівця, однаково компетентного в усіх областях фізики, проте конкурентоздатність останнього буде високою, якщо він володіє набором унікальних компетенцій [6]. Це дозволить йому ефективно диференціювати набуті знання теоретичного та прикладного характеру. Завданням професорсько-викладацького складу є створення системи випереджаючої підготовки конкурентоздатних фахівців з унікальним набором знань для виробництва та науково-дослідної роботи.

У даній роботі авторами продемонстровано практичну цінність лабораторного практикуму з ІЧ-спектроскопії як на виробництві, так і при подальших наукових дослідженнях, використовуючи неруйнівний метод зовнішнього ІЧ-відбивання.

Спектрофотометри ИКС-31, ИКС-29, ИКС-40 та ін. набули широкого вжитку завдяки можливості проводити дослідження фізико-хімічних властивостей речовин у різних агрегатних станах (твердому, рідкому, газоподібному), не руйнуючи досліджувані зразки. Серед методів дослідження вагоме місце належить методам інфрачервоної спектроскопії, а саме: спектроскопії зовнішнього відбивання та пропускання, порушеного повного внутрішнього відбивання та багаторазового порушеного повного внутрішнього відбивання. Кожен з перерахованих методів доповнює один одного і дозволяє отримати експериментальні дані, що містять інформацію про фізико-хімічні властивості речовин у широкому температурному та спектральному діапазоні, не руйнуючи саму речовину [4, 7].

На кафедрі фізики Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя розроблена експериментальна та теоретична база лабораторного практикуму з ІЧ-спектроскопії, до складу якої належить інфрачервоний спектрофотометр ИКС-31 при використанні приставок ИПО-22 – для дослідження зовнішнього відбивання та пропускання в інфрачервоній області спектра. Цей прилад є головним аналітичним інструментом серед сучасних неруйнівних методів дослідження тонких полі- та монокристалічних плівок з різним ступенем легування, рухливістю та провідністю, оптично-анізотропних монокристалів при різних орієнтаціях оптичної вісі кристала. Експериментальні дані в

поєднанні з математичним апаратом дають детальну інформацію про об'ємні та поверхневі властивості напівпровідників та діелектриків.

Навчальна дисципліна "Оптика поверхні напівпровідників", до якої входить лабораторний практикум з ІЧ-спектроскопії, містить лекційний курс, що включає інтерактивні мультимедіа-компоненти, теоретичний практикум з методичними вказівками, а також довідник з основними термінами, які використовуються при вивченні вказаної дисципліни, з позначеннями і величинами основних фізичних констант. Контроль теоретичної підготовки здійснюється за допомогою розроблених фахових тестів для ЕОМ. Необхідно підкреслити, що використання сучасних приладів при дослідженні напівпровідникових структур вимагає високого рівня теоретичної підготовки студентів. Даний рівень підготовки можна забезпечити тільки у разі магістерських освітніх програм.

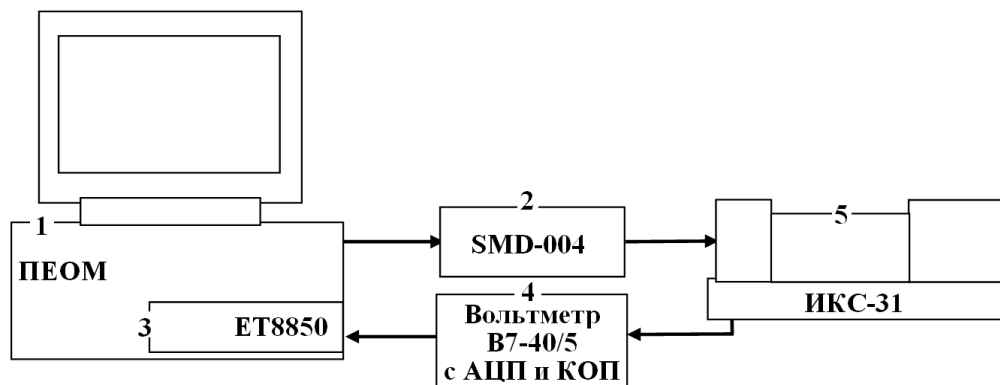
На мал. 1 представлено науково-дослідний комплекс, на основі якого побудовано лабораторний практикум для магістрів спеціальності "Прикладна фізика та наноматеріали".



Мал. 1. Вигляд установки під час роботи

У комплексі реалізована можливість вибору рівня вищої освіти магістр або аспірант, а також рівня складності – нормальний або підвищений.

Як видно з малюнка, комплекс складається з приладу ИКС-31, апаратної та програмної частин. Структуровану схематичну будову комплексу подано на мал. 2. Апаратна частина комплексу входить до складу установки і призначена для автоматизації спектрометричних вимірювань на базі спектрометра ИКС-31. Програмне забезпечення є частиною апаратно-програмного комплексу, який являє собою макет системи для гоніометричних досліджень.



Мал. 2. Будова комплексу. 1 - ПЕОМ; 2 - модуль SMD-004 (управління кроковим двигуном); 3 - інтерфейс КОП ET8850; 4 - вольтметр B7-40/5; 5 - спектрометр ИКС-31

Вказане забезпечення призначене для управління ИКС-31: задання початкових даних і параметрів експерименту; реєстрацію напруги в залежності від поділок на шкалі барабана в заданому діапазоні хвильового числа; задання кроку зміни поділок барабана; задання числа вимірювань в кожній точці; виконання заданої кількості циклів сканування з подальшим усередненням отриманих результатів; візуалізація спектра в режимі реального часу; запис результатів на диск з формуванням файлів, що містять дані і опис умов експерименту; попередня обробка даних експерименту. Параметри настройки програми автоматично зберігаються в файл при виході з програми, що дозволяє за необхідності автоматично завантажуватися при запуску програми.

При виконанні робіт лабораторного практикуму кожен із магістрів згідно з графіком самостійно проводить експериментальні вимірювання на спектрофотометрі. Йому необхідно ввести в ЕОМ для проведення експерименту наступні дані: 1) інформацію про зразок та умови експерименту; 2) задання поточного значення поділок барабана; 3) початок та кінець інтервалу сканування; 4) крок сканування в поділках барабана; 5) кількість вимірювань у одній точці (може бути змінено під час сканування) та кількість циклів сканування.

Після проведення експерименту в комплексі передбачено обробку отриманих даних: 1) поєднання кількох експериментальних кривих на одному графіку; 2) додавання, віднімання, множення, ділення експериментальних кривих одна на одну, графічна візуалізація і запис результату в файл на диску; 3) згладжування, нормування, диференціювання, множення на число кривих, показаних на екрані і запис результатів у файл; 4) друк графіка; 5) запис графіка в файл в графічному форматі.

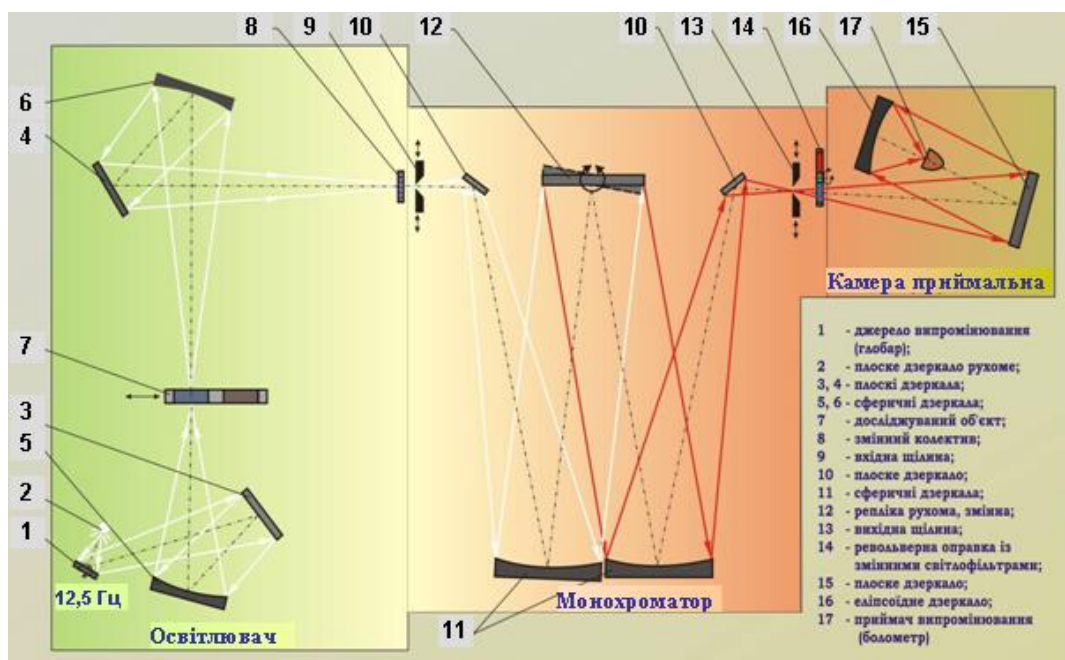
Отримані експериментальні дані вимірювань зберігаються на ЕОМ і доступні магістру і викладачеві. Це дозволяє викладачеві спільно із магістрами здійснювати аналіз отримуваних даних у реальному часі, а основне вказувати на можливі помилки і шляхи їх усунення.

Технічні можливості лабораторно практикуму дозволяють проводити математичну обробку даних на будь-якій ЕОМ, що під'єднана до мережі Інтернет. Крім того, у перспективі відкриваються можливості для інтеграції дистанційного навчання з поєднанням експериментального дослідження та теоретичної обробки даних, а також віртуальної співпраці магістр – викладач.

Впровадження методів комп'ютерного моделювання в цикл лабораторного практикуму має суттєві переваги і сприяє зниженню витрат на проведення високоартісних фізичних експериментів на науково-технологічному обладнанні. Це стало можливим завдяки десятирічному накопиченню експериментальних даних, що знаходяться у загальнодоступній для магістрів базі. Такий підхід сприяє формуванню нових професійних компетенцій фахівця, необхідних для набуття навиків як науковця, так і для роботи на виробництві.

Для організації лабораторних занять на допомогу магістрам пропонується посібник. Посібник містить практичні завдання, що дозволяють набути необхідні навички з роботи на інфрачервоному спектрофотометрі. У посібнику для магістрів детально описуються лабораторні роботи з послідовним планом їх виконання, всі дії супроводжуються ілюстраціями.

Для розуміння принципу роботи спектрофотометра ИКС-31 магістри вивчають інтерактивну схему приладу, представлену на мал. 3.



Мал. 3. Оптична схема спектрофотометра ИКС – 31

Як приклад продемонструємо дослідження монокристалів карбіду кремнію. Вибір саме монокристалів SiC, як об'єкта дослідження, пов'язаний, по-перше, з тим, що він є основою для створення ряду напівпровідникових приладів – високотемпературних діодів, люмінесцентних індикаторів, лічильників ядерних випромінювань, фотоприймачів, тензодатчиків, терморезисторів, польових транзисторів з *p-n*- переходом та ін. [4]. По-друге, SiC характеризується великою кількістю схожих кристалічних структур, званих політипами. На даний час існує 250 політипів карбіду кремнію [4]. У навчальному процесі це дає можливість магістрам проводити дослідження відмінних за своїми властивостями напівпровідників.

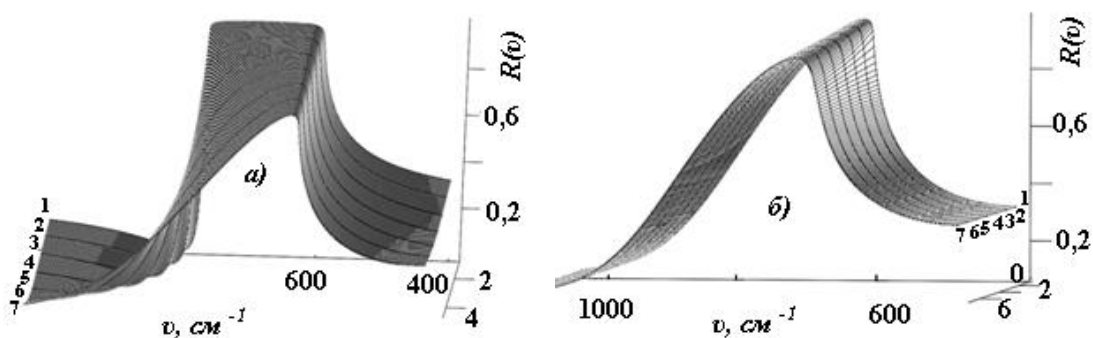
Одним з найбільш розповсюджених політипів є 6H-SiC. Він належить до просторової групи вюртциту  $R\bar{6}_3mc$ . У лабораторному практикумі використовуються монокристали 6H-SiC, концентрація, рухливість та провідність яких є відомими. Це значно спрощує перевірку достовірності отриманих даних.

Кінцевим завданням кожного магістра є необхідність побудови і апробації алгоритму щодо визначення оптичних та електрофізичних параметрів карбіду кремнію за допомогою визначених параметрів плазмової частоти  $\nu_p$ , коефіцієнта затухання плазмонів  $\gamma_p$  та фононів  $\gamma_\phi$  на основі дисперсійного аналізу експериментальних та теоретичних спектрів ІЧ-відбивання [7].

На мал. 4 подано поверхні відбивання в ІЧ-області спектра, які розраховані за допомогою формул Гельмгольца-Кеттлера в середовищі MathCAD [5, 8, 9]. Набір кривих дозволяє прослідкувати залежності коефіцієнта відбивання від оптичних та електрофізичних параметрів системи (дійсної та уявної частин діелектричної проникності, зазначених вище даних  $\nu_p, \gamma_p, \gamma_\phi$ ).

У цьому випадку монокристали задовільно моделюються одним осцилятором з частотою поперечного оптичного фонона  $\nu_T = 797 \text{ см}^{-1}$  та коефіцієнтом його затухання  $\gamma_\phi = 3 \text{ см}^{-1}$  при значеннях статичної та високочастотної діелектричної проникності відповідно  $\epsilon_0 = 9,66$  та  $\epsilon_\infty = 6,52$ .

Провівши аналіз сімейства кривих, представлених на мал. 4, а для нелегованого 6H-SiC, магістр робить висновок про вплив електрофізичних параметрів на ту чи іншу ділянку спектра відбивання. Так, різкий підйом (спуск) у спектрах залежності коефіцієнта відбивання спостерігається на частоті  $\nu = 780 \text{ см}^{-1}$  ( $1000 \text{ см}^{-1}$ ) при  $R_{\max}(\nu) = 0,986$  ( $R_{\min}(\nu) = 0,0004$ ). Зростання  $\gamma_p$  призводить до зменшення крутизни зміни залежності  $R(\nu)$  в області поздовжнього оптичного фонона  $\nu_L$ . Провівши математичний аналіз, можна зробити висновок, як саме значення  $\nu_p$  та  $\gamma_p$  впливають на значення  $R(\nu)$  коефіцієнта відбивання в точці максимуму та мінімуму. Іншими словами, який частотний діапазон є найбільш чутливим до зміни концентрації та рухливості.



Мал. 4. Розрахунковий спектр відбивання  $R(\nu, \nu_p)$  від поверхні SiC-6H:

а)  $n_0 = 6,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; б)  $n_0 = 1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

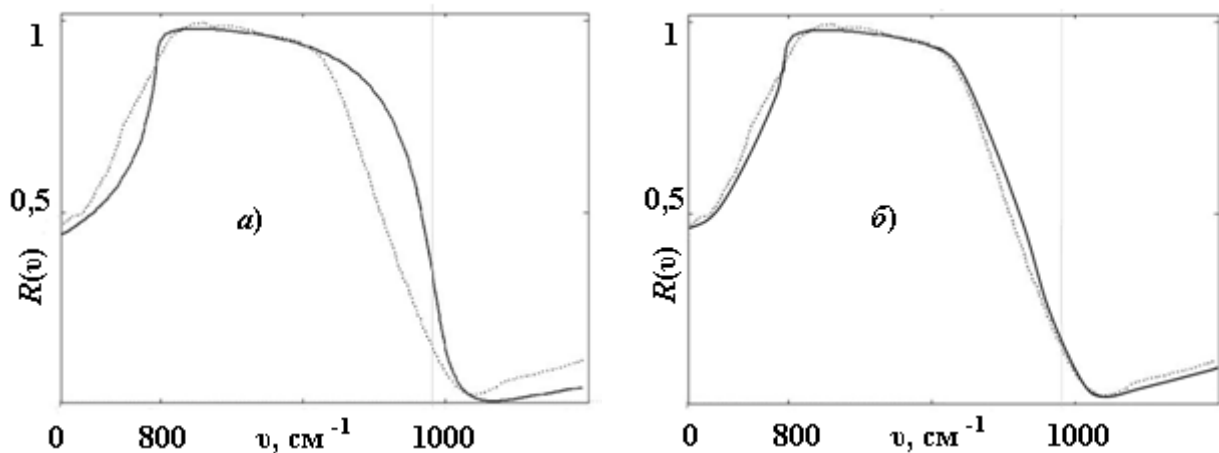
На мал. 4, б представлено спектр  $R(\nu)$  для сильно легovanого 6H-SiC. Моделювання проведено при  $\nu_p = \gamma_p = 900 \text{ см}^{-1}$  для різних коефіцієнтів затухання фононів  $\gamma_\phi = 3$  (крива 1) –  $15 \text{ см}^{-1}$  (крива 7). Графік має пік з максимумом відбивальної здатності, але він значно гостріший, ніж для випадку, розглянутому на мал. 4, а. Спад  $R(\nu)$  спостерігається після частоти максимуму  $818 \text{ см}^{-1}$  ( $R(\nu) = 0,965$ ) до  $1200 \text{ см}^{-1}$  ( $R(\nu) = 0,088$ ). Далі відбивальна здатність не змінюється, тримаючись у межах свого мінімального значення. При більших значеннях  $\gamma_\phi$  пік з максимумом трохи нижчає до значення  $R(\nu) = 0,903$  на частоті  $827 \text{ см}^{-1}$ . При  $\nu = 1200 \text{ см}^{-1}$   $R(\nu) = 0,084$ .

Невідомі параметри визначались за допомогою алгоритму, розробленого в середовищі MathCAD. Алгоритм полягає в порівнянні експериментальних спектрів відбивання з розрахунковими. Змінюваними параметрами були  $\nu_p$ ,  $\gamma_p$ ,  $\gamma_\phi$ . Вірогідність оцінки значення параметра контролювалась шляхом пошуку мінімальної середньоквадратичної похибки  $\delta$  за формулою:

$$\delta = \sum_{i=1}^N \sqrt{((R_E(\nu) - (R_T(\nu)))^2)} \quad (1)$$

Функція  $\delta$  характеризує точність підгонки розрахунку до експерименту: чим менше значення  $\delta$ , тим точніше підібрані параметри  $\nu_p$ ,  $\gamma_p$ ,  $\gamma_\phi$ .

На мал. 5 представлено спектри зовнішнього відбивання 6H-SiC у порівнянні з теоретично розрахунковим спектром.



Мал. 5. Розрахунковий та експериментальний спектри відбивання  $R(\nu, \nu_p)$  від поверхні SiC-6H при  $n_0 = 6,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Пунктирна лінія - експеримент; суцільна лінії - розрахунок.

На мал. 5, *a* суцільною лінією представлено розрахунковий спектр за параметрами, отриманими для нелегованого карбиду кремнію (політип 6H) в монографії [4]. Ці розрахунки проведено в середовищі MathCAD для значень  $\gamma_\phi = 3 \text{ см}^{-1}$ ,  $\gamma_p = 400 \text{ см}^{-1}$ ,  $\nu_p = 410 \text{ см}^{-1}$ . Провівши дисперсійний аналіз магістр отримує графіки, представлені на мал. 5, *б* і згідно формули (1) найкраще узгодження спостерігається при  $\delta = 0,070$ , що відповідає наступним параметрам:  $\gamma_\phi = 3 \text{ см}^{-1}$ ,  $\gamma_p = 480 \text{ см}^{-1}$ ,  $\nu_p = 460 \text{ см}^{-1}$ . Цих даних достатньо, щоб за формулами роботи [7] отримати значення концентрації, рухливості та провідності.

Розбіжність між експериментальними та теоретичними даними можна пояснити тим, що для побудови теоретичних спектрів використовувались параметри "ідеалізованої" поверхні монокристала, взятої з роботи [4], а в реальних зразках має місце ще й вплив обробки поверхні на відбивальну здатність.

Таким чином, впровадження сучасного наукового комплексу в навчальний процес у вигляді лабораторного практикуму здатне не лише підвищити засвоєння теоретичних знань студентів у галузі оптики поверхні напівпровідників, але й дозволити їм набути практичні навички для подальшої роботи на виробництві або навчання в аспірантурі.

### Використані джерела

1. Стеченко Д.М., Чмир О.С. Методологія наукових досліджень: Підручник. – К.: Знання, 2005. – 309 с.
2. Петренко С.В., Каленик М.В. Підготовка майбутніх учителів до дослідницької діяльності: Ч. 1: Навч. посібник для фізико-математичного факультету. – Суми: Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка, 2009. – 68 с.

3. Основы научных исследований: Учебно-метод. пособие / А.Н. Огурцов // Харьков: НТУ "ХПИ", 2008. – 178 с.
4. Венгер Є.Ф., Мельничук О.В., Пасічник Ю.А. Спектроскопія залишкових променів. – К. : Наук. думка, 2001. – 192 с.
5. Пасічник Ю. Удосконалення методичного забезпечення прогнозування науково-технологічного розвитку / Юрій Пасічник // Вища шк. – 2008. – № 2. – С. 89 – 97.
6. Пометун О. Компетентнісний підхід – найважливіший орієнтир розвитку сучасної освіти / Олена Пометун // Рідна школа. – 2005. – Січень. – С. 65 – 69.
7. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 366 с.
8. Дьяконов В.П., Авраменкова И.В. MathCAD 7.0 в математике, физике и в Internet. – М.: Нолидж, 1998. – 352 с.
9. Тихоненко А.В. Компьютерные математические пакеты в курсе общей физики: Уч. пособие по курсу "Общая физика". – Обнинск: ИАТЭ, 2003. – 84 с.

Venger E., Melnichuk L., Melnichuk O.

#### APPLICATION OF SCIENTIFIC EQUIPMENT AT REALIZATION OF LABORATORY PRACTICAL WORK OF IR-SPECTROSCOPY

*The article indicated the need of training in high school universal competitive specialist at the labor market for manufacturing and scientific research, who will be equally competent in all areas of physics and have a unique set of skills.*

*The authors first developed an experimental and theoretical basis of laboratory work on IR spectroscopy, part of which the IR spectrophotometer IKS-31 using top boxes YPO-22, to study the external reflection and transmission in the infrared region of the spectrum. It is shown that this device is the main analytical tool of modern non-destructive research methods and monocrystalline thin polymer films with varying degrees of doping, mobility and conductivity, optically anisotropic single crystals with different orientations of the optical axis of the crystal.*

*The article emphasized the completion of the work, that is: training course "Optics semiconductor surface", which includes laboratory practice of IR spectroscopy includes lectures, including interactive multimedia components, theoretical practical work with methodological guidelines, and guide with the basic terms used in the study indicated discipline of symbols and values of fundamental physical constants.*

*As an example, demonstrated the study of single crystals of silicon carbide (6H polytype).*

*It was established that the introduction of modern scientific complex in the learning process as a laboratory workshop is able to not only increase the assimilation of theoretical knowledge of students in the field of optics semiconductor surface but also enable them to acquire practical skills for further work in manufacturing or postgraduate degrees.*

**Key words:** reflection spectrum, silicon carbide, computer modeling, scientific research work.

Стаття надійшла до редакції 24.05.2016