

УДК 378.016.091

Венгер І. В., Венгер Є. Ф., Корсунська Н. О., Мельничук Л. Ю.,
Мельничук О. В., Хоменкова Л. Ю.

ФІЗИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ЯК ОСНОВА ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНЬОГО ФАХІВЦЯ ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ "ПРИКЛАДНА ФІЗИКА ТА НАНОМАТЕРІАЛИ"

У роботі продемонстровано практичну цінність однієї з фахових дисциплін "Спеціальний фізичний практикум", яка вивчається при підготовці за освітньо-науковою програмою магістрів із спеціальності "Прикладна фізика та наноматеріали". Показано доцільність вивчення даної дисципліни у низці лабораторій, які об'єднані між собою за тематикою досліджень та складністю обладнання. Продемонстровано важливість проведення експерименту у різних лабораторіях та вказано на можливість дослідження фізичних величин взаємодоповнюючими методами. Підкреслено важливість та ефективність використання отриманих знань та навичок, як у навчальному процесі, так і на виробництві.

Ключові слова: спеціальний фізичний практикум, ІЧ-спектроскопія, комп'ютерне моделювання, спектр відбивання, карбід кремнію, ефект Холла.

Формування висококваліфікованих фахівців за спеціальністю "Прикладна фізика та наноматеріали" немислима без постійного удосконалення як фахової теоретичної підготовки з фізико-математичних дисциплін, так і набуття практичних навичок у проведенні експериментальних досліджень у лабораторіях ВНЗ та на виробництві. Особливе місце при організації фундаментальної навчання магістрів-фізиків належить ВНЗ. Після завершення навчання вони володіють достатніми вміннями і навичками для роботи на лабораторному обладнанні і здатні використовувати набуті компетенції при роботі з сучасними науково-дослідними комплексами у своїй подальшій професійній діяльності. Виконання лабораторного практикуму дозволяє не тільки забезпечити високий рівень загальної освіти, але й мати чітку професійну спрямованість з урахуванням міжпредметних зв'язків.

На сьогоднішній день існує низка наукових та методичних праць, у яких автори всебічно обґрунтовують необхідність подальшого вдосконалення методики проведення фізичного експерименту у спеціальних лабораторіях ВНЗ та її апробації на виробництві [1–11]. У зв'язку з цим питання розробки нових та удосконалення існуючих лабораторних практикумів щодо підготовки фахівців, які здатні володіти передовими технологіями, використовуваними у наукових дослідженнях та на виробництві, не викликають сумніву.

Метою даної роботи є використання у навчальному процесі при підготовці магістрів "Прикладної фізики та наноматеріалів" лабораторних практикумів, об'єднаних у спеціальний практикум з фізики на основі нових лабораторних робіт або модернізації існуючих шляхом проведення їх автоматизації.

Згідно з законом України про "Про вищу освіту", підготовка висококваліфікованого фахівця за спеціальністю "Прикладна фізика та наноматеріали" у ВНЗ відбувається за двома рівнями "бакалавра" та "магістра" [12], кожен з яких характеризується відповідною кількістю кредитів: від 60 до 240. Так, навчальний план у ВНЗ за освітньо-кваліфікаційним рівнем "бакалавр" для вказаної спеціальності передбачає здобуття студентом теоретичних знань та практичних вмінь і навичок, достатніх для успішного виконання професійних обов'язків за обраною спеціальністю [13]. Саме формування у студентів практичних умінь і навичок потребує різнорівневої розробки лабораторних практикумів, в тому числі і з курсу "Загальної фізики", провідне місце серед яких належить лабораторним практикумам з розділів "Механіка", "Молекулярна фізика та термодинаміка", "Оптика" тощо. До кожного з лабораторних практикумів авторами даної статті було підготовлено і опубліковано навчальні посібники з грифом МОН України [14–16], де представлено від 30 до 50 лабораторних робіт з кожної дисципліни. Проведений аналіз зрізів знань показав, що підготовка та виконання лабораторних робіт, описаних у вказаних навчальних посібниках, значно підвищила результативність і якість роботи студентів за освітньо-кваліфікаційним рівнем бакалавр. Це підтверджують і результати державної екзаменаційної комісії (ДЕК). Так, із звітів голів ДЕК випливає, що протягом останніх п'яти років спостерігається підвищення рівня теоретичних знань студентів, набуття навичок роботи з фізичним обладнанням, розширення фізичного кругозору і т.п. На підставі цього можна зробити висновок про доцільність та

необхідність подальшого удосконалення і модернізації існуючих лабораторних практикумів, в тому числі проведення їх подальшої автоматизації та впровадження у навчальний процес нових лабораторних робіт з використанням сучасних ЕОМ як пристроїв, здатних моделювати фізичні процеси, виходячи з конкретних теоретичних моделей.

Проте, значно складнішою є задача у підготовці лабораторних практикумів з різних напрямків сучасної фізики за освітньо-кваліфікаційним рівнем "магістр", що здобувається на другому рівні вищої освіти та присуджується ВНЗ в результаті успішного виконання здобувачем вищої освіти відповідної освітньої програми [12]. Саме для магістрів спеціальності "Прикладна фізика та наноматеріали" кафедрою фізики при НДУ ім. М. Гоголя розроблено і впроваджено у навчально-науковий процес нову дисципліну "Спеціальний фізичний практикум" (СФП), який складається з лабораторних практикумів, об'єднаних за тематикою досліджень у єдине ціле. Лабораторні роботи СФП розміщені в окремих лабораторіях, а саме: "Лабораторія дослідження електрофізичних властивостей напівпровідників", "Лабораторія оптики поверхні напівпровідників", "Лабораторія ІЧ-спектроскопії", "Лабораторія фізики твердого тіла", "Лабораторія обробки фізичного експерименту". Основним завданням СФП є формування у магістрантів експериментальних умінь і навичок, які необхідні при роботі у спеціальних наукових лабораторіях ВНЗ та на виробництві.

У кожній з перерахованих лабораторій СФП виконується від 5 до 10 лабораторних робіт. Основні критерії, що ставились при їх постановці, полягали, в першу чергу, в їх вагомості з точки зору зв'язку науки і виробництва та взаємозв'язку сучасної фізики з новими методами досліджень, сучасним фізичним обладнанням, методами проведення складного фізичного експерименту. Їх зміст відповідає основним принципам дидактики доступності, систематичності, науковості, наочності, професіоналізму тощо.

Усі роботи СФП є автоматизованими, що сприяє формуванню у магістрів різнобічних експериментальних умінь і навичок при роботі на сучасних установках, в тому числі при використанні інформаційно-комунікаційних технологій при обробці результатів досліджень. Проведена автоматизація лабораторних робіт СФП збільшує частину часу, необхідного для осмислення і інтерпретації отриманих даних, вивільняє час для проведення додаткових вимірювань, якщо з'явилися сумніви в достовірності попередніх, для постановки експерименту в нових, змінених умовах, якщо це потрібно для перевірки робочої гіпотези щодо інтерпретації експериментальних фактів.

Слід відмітити, що важливим елементом у підготовці фахівця із спеціальності "Прикладна фізика та наноматеріали" є використання в навчальному процесі сучасного наукового обладнання або автоматизованого існуючого та забезпечення кожного магістра, аналогічно, як і для бакалавра, якісними методичними матеріалами, особливо детальними інструкціями при роботі з високовартісними приладами. Обладнання, що використовується у СФП, є значно складнішим за прилади, що використовуються у лабораторних роботах курсу "Загальної фізики". Вказане обладнання є багатофункціональним і тому потребує додаткових умінь і навичок при роботі з ним. Багаторічний досвід показує, що даний рівень підготовки можна забезпечити у разі магістерських, а у деяких випадках – лише аспірантських освітньо-наукових програм і на всіх етапах формування особистості, де центральне місце повинно надаватися мотиваційній складовій самого фахівця. В свою чергу, професорсько-викладацький склад кафедри постійно працює над створенням системи випереджаючої підготовки конкурентоздатних фахівців з унікальним набором знань для виробництва та науково-дослідної роботи. Випускник магістратури повинен володіти навичками вимірювання фізичних величин, вміти визначати та аналізувати похибки вимірювань, проводити оцінку одержаних експериментальних результатів, здійснювати чисельні розрахунки фізичних величин і проводити їх аналіз при вирішенні поставлених завдань та обробці експериментальних результатів. Експериментальні навички і уміння, набуті при виконанні практикуму, повинні мати досить загальний характер з перспективою використання їх у подальшій професійній діяльності. Особливо актуальним є підбір лабораторних робіт, які різними незалежними методами дозволяють комплексно досліджувати властивості одного і того ж зразка, на основі чого робити висновок про можливість їх практичного використання.

В якості прикладу продемонструємо дві лабораторні роботи СФП, які побудовані на різних фізичних явищах і виконуються у різних фізичних лабораторіях, проте дозволяють визначити одні й ті ж електрофізичні параметри напівпровідників. Так, у "Лабораторії дослідження електрофізичних властивостей напівпровідників" та "Лабораторії ІЧ-спектроскопії" виконуються відповідно лабораторні роботи "Визначення концентрації і холлівської рухливості основних носіїв заряду" та "Дослідження напівпровідників методом спектроскопії зовнішнього ІЧ-відбивання". Як випливає з самих назв, це абсолютно різні за змістом і формою лабораторні роботи. Проте, отримані результати (у межах похибки) повинні узгоджуватись між собою, оскільки стосуються одних і тих же зразків. До кожної роботи розроблена інструкція, яка містить детальний опис установки, порядок виконання роботи, контрольні запитання та розширені теоретичні відомості. Згідно навчального плану дисципліна іде без лекційного супроводу, тому для більш глибокого оволодіння матеріалом магістри повинні самостійно опрацювати

літературу, список якої подано після кожної роботи зокрема. Для кращого розуміння фізичних явищ до кожної лабораторної роботи розроблено мультимедійний супровід.

Більш детальний аналіз виконання лабораторних робіт було описано у працях [1, 17]. У даній роботі зупинимось на особливостях та відмінностях виконання лабораторних робіт СФП, пам'ятаючи, що основним завданням є необхідність продемонструвати практичні значення набутих знань, умінь та навичок, що виражається у одержанні конкретних фізичних величин, а саме: значень концентрації, рухливості та провідності досліджуваних напівпровідникових монокристалів різними методами, проведенні їх порівняльного аналізу та можливістю використання на виробництві.

Використаємо для досліджень у якості зразка гексагональні монокристали карбіду кремнію 6H-SiC, який являється одним із найбільш розповсюджених політипів [18, 19]. Крім того, у лабораторному практикумі використовуються монокристали 6H-SiC, концентрація яких відома викладачу. Це значно спрощує перевірку достовірності отриманих даних двома незалежними методами.

При виконанні робіт лабораторного практикуму кожен із магістрів згідно з графіком, розробленим кафедрою та затвердженим директором навчально-наукового інституту точних наук та економіки, самостійно проводить експериментальні вимірювання на автоматизованому спектрофотометрі ИКС-31 з приставкою ИПО-22 та на установці Холла. Процес керування установками відбувається за допомогою ЕОМ. Обчислювальна техніка дає можливість створення абсолютно нового інструментарію для обробки вимірювань, розробки принципово нових дослідницьких робіт, отримання в них кардинально нових результатів, які не можуть бути досягнуті за умов застосування стандартного обладнання. Зареєстровані експериментальні дані зберігаються у базі даних на ЕОМ. Їх математична обробка здійснюється на будь-якій ЕОМ у середовищі MathCAD.

Розглянемо кожний із методів окремо і проведемо порівняльний аналіз отриманих результатів.

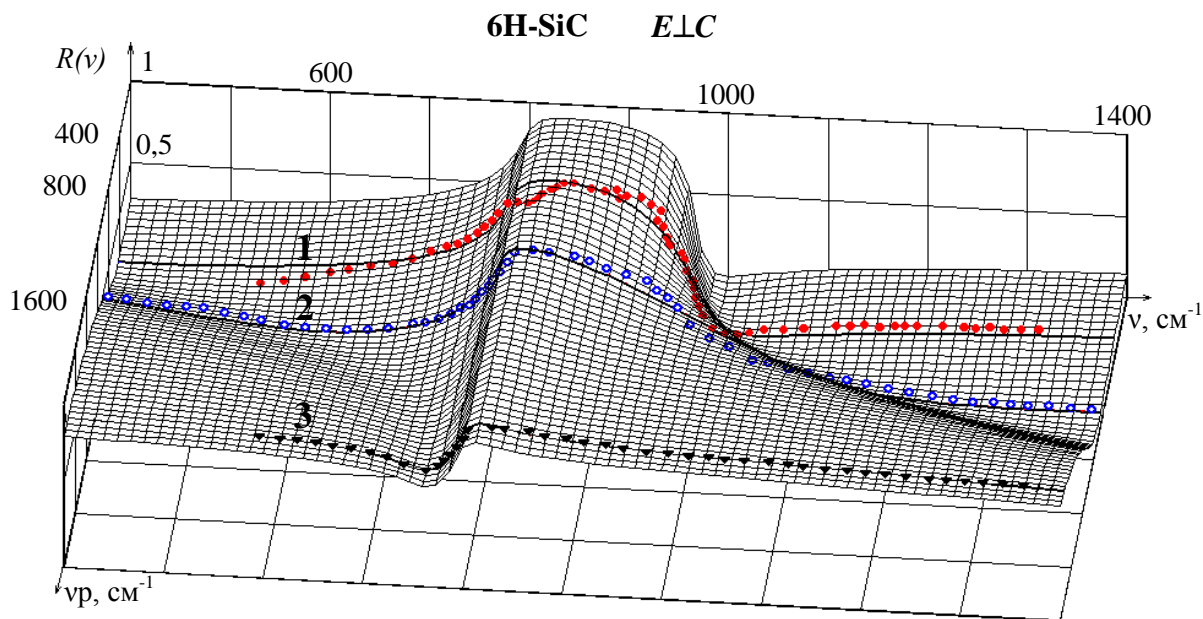
Лабораторія ІЧ-спектроскопії. На мал. 1 представлено науково-дослідний комплекс ИКС-31, на основі якого побудовано лабораторний практикум "Дослідження напівпровідників методом спектроскопії зовнішнього ІЧ-відбивання" для магістрів спеціальності "Прикладна фізика та наноматеріали".



Мал. 1. Вигляд установки під час роботи [1].

На мал. 2 подано експериментальні (точки 1–3) та сімейство розрахункових (лінії) спектрів зовнішнього ІЧ-відбивання, отриманих при скануванні за плазмовою частотою у діапазоні від $\nu_p = 50 \div 2400 \text{ см}^{-1}$ та ІЧ-випромінювання $\nu = 200 \div 1400 \text{ см}^{-1}$. Згідно джерел [18, 19], монокристали 6H-SiC задовільно моделюються одним осцилятором з частотою поперечного оптичного фонуна $\nu_T = 797 \text{ см}^{-1}$ при значеннях статичної та височастотної діелектричної проникності відповідно $\epsilon_0 = 9,66$ та $\epsilon_\infty = 6,52$. Теоретичні спектри (лінії) одержано за допомогою формул Гельмгольца-Кеттлера в середовищі MathCAD за методикою, описаною в [18–21]. Аналіз сімейства розрахункових кривих дозволяє прослідкувати залежності коефіцієнта відбивання від оптичних та електрофізичних параметрів системи ϵ' і ϵ'' – дійсної

та уявної частин діелектричної проникності при врахуванні ν_p – частоти плазмонів, γ_p – коефіцієнта згасання плазмонів та γ_ϕ – коефіцієнта згасання фононів.



Мал. 2. Спектр відбивання 6H-SiC. Лінії – розрахунок при $E \perp C$:

$\gamma_\phi = 12 \text{ cm}^{-1}$; $\gamma_p = \nu_p = 400 \div 2400 \text{ cm}^{-1}$ ($\Delta\nu_p = 50 \text{ cm}^{-1}$). Точки – експеримент:

1 – зразок ПСЕ-3Б, $n_0 = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 2 – зразок С-5, $n_0 = 1,8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; 3 – зразок SC-1, $n_0 = 8,7 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

Провівши по чергово розрахунок коефіцієнта відбивання $R(\nu)$ за різних значень ν_p , γ_p , γ_ϕ , магістр має можливість зробити висновок про вплив електрофізичних параметрів на ту чи іншу ділянку ІЧ-спектра відбивання. Так, різкий підйом (спуск) в $R(\nu)$ спостерігається на частоті $\nu = 780 \text{ cm}^{-1}$ (1000 cm^{-1}) при $R_{\max}(\nu) = 0,986$ ($R_{\min}(\nu) = 0,0004$). Зростання γ_p призводить до зменшення крутизни зміни залежності $R(\nu)$ в області поздовжнього оптичного фонона ν_L . Аналізуючи отримані дані, магістр самостійно вибирає частотний діапазон, який є найбільш чутливим для монокристалів 6H-SiC до зміни концентрації, рухливості та провідності вільних носіїв зарядів.

Одне із завдань лабораторного практикуму для кожного магістра є визначення оптичних та електрофізичних параметрів напівпровідників з невідомими для них характеристиками на основі визначених параметрів плазмової частоти ν_p , коефіцієнта згасання плазмонів γ_p та фононів γ_ϕ , використовуючи дисперсійний аналіз експериментальних та теоретичних спектрів ІЧ-відбивання [18, 19, 22].

Провівши дисперсійний аналіз сімейства кривих, представлених на мал. 2, магістр визначає параметри ν_p , γ_p , γ_ϕ при умові найкращого узгодження δ теоретичних $R(\nu)$ з експериментальними. Цих даних достатньо, щоб за формулами (1) робити [18, 22, 23] отримати значення концентрації, рухливості та провідності вільних носіїв зарядів у легованих монокристалах 6H-SiC, які представлені відповідно у табл. 1:

$$n_0 = \frac{\pi m_0 c^2 \epsilon_\infty}{q^2 \lambda_p^2}, \quad \sigma = \frac{a \epsilon_\infty}{60 \lambda_p}, \quad \mu = \frac{a c \epsilon_\infty}{2 q n_0 \lambda_p}. \tag{1}$$

Таблиця 1

Метод спектроскопії зовнішнього ІЧ-відбивання							
Зразок	$\nu_{pL}, \text{ cm}^{-1}$	$\gamma_{pL}, \text{ cm}^{-1}$	$\gamma_\phi, \text{ cm}^{-1}$	$\delta \cdot 10^{-3}$	$n_0, \text{ cm}^{-3}$	$\sigma, \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$	$\mu, \text{ cm}^2 / (\text{В с})$
ПСЕ-3Б	620	550	12	8	$7 \cdot 10^{18}$	476	424
С-5	1000	900	20	4	$1,9 \cdot 10^{19}$	756	259
SC-1	2250	700	23	5	$9,3 \cdot 10^{19}$	4920	335

Лабораторія дослідження електрофізичних властивостей напівпровідників

При виконанні лабораторного практикуму "Визначення концентрації і холлівської рухливості основних носіїв заряду" перед магістром ставиться завдання, яке полягає у вивченні теорії гальваномагнітних ефектів у напівпровідниках, ознайомленні з будовою та усвідомленні принципу роботи лабораторного комплексу, до якого входить установка Холла, а також набуття умінь і навичок у проведенні експериментальних досліджень електрофізичних параметрів напівпровідників.

Безпосередньо для дослідження використано леговані монокристали $6H-SiC$, що мають розміри $a = b = 8 \text{ мм}$, $d = 3 \text{ мм}$ і застосовувались у попередній лабораторній роботі.

На мал. 3 та 4 показано відповідно установку Холла та її схематичне представлення, що використовується при виконанні лабораторного практикуму. Дана установка дозволяє визначати в автоматизованому режимі концентрацію носіїв заряду, їх рухливість та питомий опір досліджуваного зразка. Основними складовими установки є електромагніт, джерело постійного струму Б5-45, комбінований цифровий прилад Щ4300 в якості міліамперметра для вимірювання сили струму в зразку, магазин опорів Р33, ключ K , зразок із напівпровідника з п'ятьма контактами (1–5). Для вимірювання холлівської різниці потенціалів U_x та спаду напруги U_σ на зразку використовується комбінований цифровий прилад Щ300.

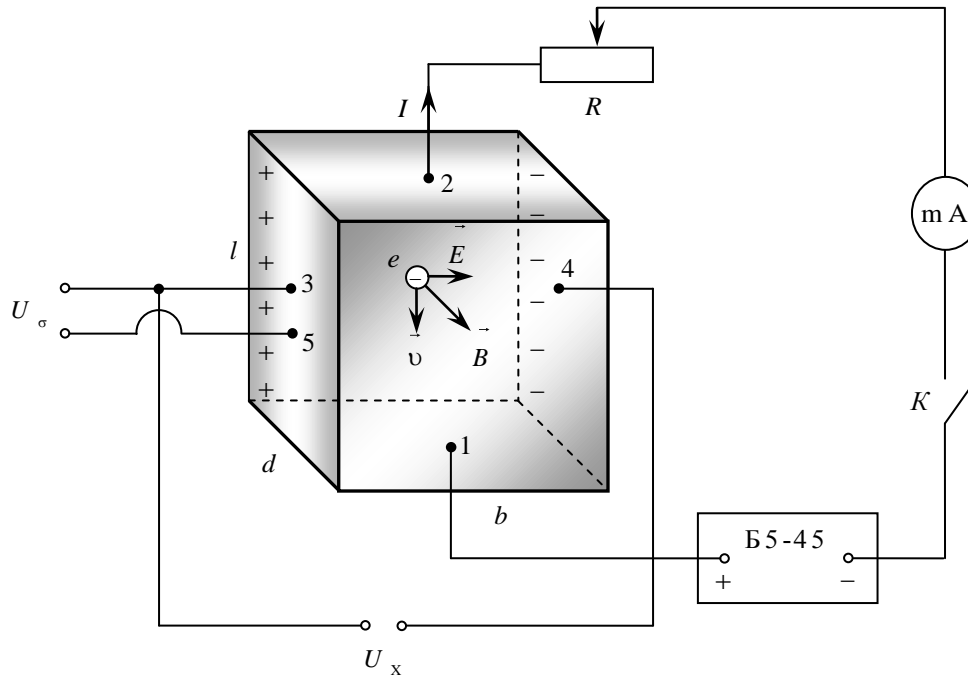
Із теоретичних відомостей магістр повинен усвідомити, які саме фізичні процеси відбуваються та за яким принципом працює установка Холла і чому відбувається перерозподіл носіїв заряду в об'ємі напівпровідника під дією сили Лоренца.



Мал. 3. Лабораторна установка Холла

Монокристал $6H-SiC$ струмовими контактами 1 і 2 фіксується на тримачі з органічного скла (див. мал. 3, 4). До контактів 1 – 2 підводиться напруга від джерела постійного струму Б5-45 для проходження струму через зразок $6H-SiC$. Контакти 3 – 5 дають можливість вимірювати спад напруги U_σ на зразку при встановленій силі струму I . Слід пам'ятати, що пластинка повинна мати достатні об'ємні розміри, щоб поперечне електричне поле в ній було однорідним і подібним до поля в плоскому конденсаторі. Холлівська різниця потенціалів між точками 3 і 4 (див. мал. 4) дорівнює $U_x = E_x b = \vec{v} b v$. Опір між контактами 3 – 5 обчислюється за формулою:

$$R = \frac{U_\sigma}{I} = \frac{l}{\sigma b d}, \quad (2)$$



Мал. 4. Електрична схема лабораторної установки Холла

Враховуючи, що n_0 – концентрація електронів, \bar{v} – їх середня швидкість впорядкованого руху, а сила струму $I = en_0 \bar{v} S$, де $S = db$ – площа поперечного перерізу пластинки, матимемо:

$$U_x = \frac{1}{en_0} \cdot \frac{IB}{d} = R_x \frac{IB}{d}. \quad (3)$$

Величина R_x , яка пов’язує холлівську різницю потенціалів U_x з індукцією магнітного поля $B = 0,48$ Тл і силою струму I через зразок **6H-SiC**, називається сталою Холла, яка визначається з виразу:

$$R_x = \frac{1}{en_0}. \quad (4)$$

Згідно електронної теорії [24, 25], *питома електропровідність* речовини обчислюється за формулою

$$\sigma = en_0 \mu, \quad (5)$$

де μ – рухливість носіїв заряду.

Добуток

$$R_x \sigma = \frac{1}{en_0} en_0 \mu = \mu \quad (6)$$

за своїм фізичним змістом є рухливістю, яка в даному випадку є *холлівською*.

Питома електропровідність

$$\sigma = \frac{Il}{U_\sigma bd}, \quad (7)$$

де $l = 0,8$ см – відстань між вказаними контактами (мал. 4).

Таблиця 2

Метод Холла							
Зразок	U_x, B	U_σ, B	I, A	$R_x, \frac{cm^3}{Kl}$	n_0, cm^{-3}	$\sigma, Om^{-1} \cdot m^{-1}$	$\mu, \frac{cm^2}{(Vs)}$
ПСЕ-3Б	6,6	$5,6 \cdot 10^{-6}$	0,0005	0,825	$7,57 \times 10^{18}$	298	245
С-5	2,5	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,0005	0,313	2×10^{19}	694	217
SC-1	0,38	$3,4 \cdot 10^{-6}$	0,00025	0,095	$6,6 \times 10^{19}$	245	23

Із результатів дослідження випливає, що кожен із методів СФП, проведений у "Лабораторії дослідження електрофізичних властивостей напівпровідників" та "Лабораторії ІЧ-спектроскопії" дозволяє визначити класичний набір електрофізичних параметрів (концентрацію вільних носіїв зарядів, їх рухливість та провідність) напівпровідників. Порівнюючи електрофізичні параметри монокристалів *6H-SiC*, отриманих двома різними методами, при виконанні СФП магістр робить висновок про ідентичність результатів у межах похибки експерименту. Крім того, запропонований комплексний підхід до виконання СФП вказує, що кожен із методів надає можливість визначити параметри, які неможливо одержати іншим методом. Так, виконуючи лабораторну роботу "Дослідження напівпровідників методом спектроскопії зовнішнього ІЧ-відбивання" магістр отримує дані про фононну та плазмову підсистеми, залежності показника заломлення та поглинання від частоти ІЧ-випромінювання, що, в свою чергу, дозволяє розрахувати функцію, яка описує залежність дійсної та уявної діелектричної проникності від частоти. Лабораторний практикум "Визначення концентрації і холлівської рухливості основних носіїв заряду" дає змогу визначити знак сталого Холла, а отже, визначити тип провідності напівпровідника. Так, при електронній провідності відповідно $R_H < 0$, а при дірковій $R_H > 0$. Крім того, даний практикум дозволяє досліджувати залежності концентрації електронів, їх рухливості та питомий електроопір від температури тощо. Проте, у даній частині СФП магістр зіткнувся із неузгодженням між собою фізичних параметрів, отриманих двома методами, наприклад, рухливість носіїв заряду у зразку SC-1.

Таким чином, проведення фізичного експерименту на основі нових лабораторних практикумів або використання автоматизованих наукових установок у навчальному процесі при вивченні дисципліни "Спеціальний фізичний практикум" здатне не лише підвищити засвоєння теоретичних знань магістрів у галузі фізики твердого тіла, але й дозволити їм набути практичні навички для подальшої роботи на виробництві або навчання в аспірантурі.

Використані джерела

1. Венгер Є. Ф., Мельничук Л. Ю., Мельничук О. В. Застосування наукового обладнання при виконанні лабораторного практикуму з ІЧ-спектроскопії // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. Серія: Педагогічні науки. – Вип. 138. – 2016. – С. 14–19.
2. Венгер Є. Ф., Мельничук Л. Ю., Мельничук О. В., Савченко В. Ф. Моделювання спектрів ІЧ-відбивання оксиду цинку при виконанні лабораторного практикуму // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. Серія: Педагогічні науки. – Чернігів: ЧНПУ, 2017. – Вип. 146. – С. 17–24.
3. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 239 с.
4. Воробьев Ю. В., Добровольский В. Н., Стриха В. И. Методы исследования полупроводников: Уч. пособие. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1988. – 232 с.
5. Горин Владимир Викторович. Методика адаптации современного физического эксперимента к условиям специального практикума педагогического вуза : Дис.. канд. пед. наук: 13.00.02 : Москва, 2000. – 184 с.
6. Бирюков С. В., Горин В. В., Ильин В. А., Соина Н. В. Изучение сложных вопросов физики колебаний в специальном практикуме по физике педагогического вуза с помощью компьютерного моделирования // Физическое образование в вузах. – 1997. – Т. 3, № 3. – С. 35 – 41.
7. Бирюков С. В., Горин В. В., Ильин В. А., Соина Н. В. Изучение сложных вопросов физики колебаний методом компьютерного моделирования. Лабораторная работа в специальном практикуме // Преподавание физики в высшей школе. – 1997. – № 10. – С. 27 – 32.
8. Обладнання для наукових досліджень. – Режим доступу: <http://chemtest.com.ua/ik-fure-spektrometr-iraffinity-1>.
9. Пометун О. Компетентнісний підхід – найважливіший орієнтир розвитку сучасної освіти / Олена Пометун // Рідна школа. – 2005. – Січень. – С. 65 – 69.
10. Стеченко Д. М., Чмир О. С. Методологія наукових досліджень: Підручник. – К.: Знання, 2005. – 309 с.
11. Основы научных исследований: Учебно-метод. пособие / А. Н. Огурцов // Харьков: НТУ "ХПИ", 2008. – 178 с.
12. Закон України №1556-VII "Про вищу освіту" від 01.07.2014 р.
13. Положення про організацію освітнього процесу в Ніжинському державному університеті імені Миколи Гоголя. – http://www.ndu.edu.ua/storage/2017/polozennia_pro_org_osv_proz.pdf.
14. Венгер Є. Ф., Мельничук Л. Ю., Мельничук О. В., Шевчук О. Г. Механіка. Молекулярна фізика та основи термодинаміки. Лабораторний практикум. – К.: Такі справи, 2000. – 256 с.
15. Венгер Є. Ф., Мельничук Л. Ю., Мельничук О. В. Механіка. Лабораторний практикум: Навч. посібник. – Ніжин: Видавництво НДУ ім. М. Гоголя, 2007. – 226 с.
16. Венгер І. В., Венгер Є. Ф., Мельничук Л. Ю., Мельничук О. В. Лабораторний практикум з оптики: Навч. посібник. – К.: Видавництво "Академперіодика", 2018. – 635 с.
17. Аніщенко В. О., Венгер Є. Ф., Корсунська Н. О., Мельничук Л. Ю., Хоменкова Л. Ю. Електричні методи дослідження матеріалів. Лабораторний практикум: Навч. посібник / За ред. Л. Ю. Мельничук. – Ніжин: Видавництво НДУ ім. М. Гоголя, 2018. – 153 с.

18. Дьяконов В. П., Авраменкова И. В. MathCAD 7.0 в математике, физике и в Internet. – М.: Нолидж, 1998. – 352 с.
19. Тихоненко А. В. Компьютерные математические пакеты в курсе общей физики: Уч. пособие по курсу "Общая физика". – Обнинск: ИАТЭ, 2003. – 84 с.
20. Венгер С. Ф., Мельничук О. В., Пасічник Ю. А. Спектроскопія залишкових променів. – К.: Наук. думка, 2001. – 192 с.
21. Мельничук А. В., Пасечник Ю. А. Анизотропия эффективных масс электронов в карбиде кремния // ФТТ. – 1992. – Т. 34, № 2. – С. 423 – 428.
22. Кухарский А. А., Субашиев В. К. Определение некоторых параметров сильно легированных полупроводников из спектрального хода коэффициента отражения кремния // ФТТ. – 1966. – Т. 8, № 3. – С. 753 – 758.
23. Уханов Ю. И. Оптические свойства полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 366 с.
24. Шалимова К. В. Физика полупроводников: Учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 164 – 176; 378 – 381.
25. Кучис Е. В. Методы исследования эффекта Холла. – М.: Сов. радио, 1974. – 328 с. – Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/2283431/grant/>.

*Venger I., Venger E., Korsunsk N., Melnichuk L.,
Melnichuk O., Khomenkova L.*

PHYSICAL EXPERIMENT AS A BASIS FOR THE TRAINING OF FUTURE SPECIALISTS IN THE FIELD OF "APPLIED PHYSICS AND NANOMATERIALS"

This work demonstrates the practical value of one of the most important professional disciplines "Special Physical Practicum" (SFP), which is being studied in the MSc course of the educational and scientific program in the specialty "Applied physics and nanomaterials". It is shown the necessity for the education of a universal competitive specialist for the labor market for manufacturing and research, who have ground knowledge in all areas of physics and possess a set of unique competencies. It is emphasized that the main task of SFP is the formation of the experimental abilities and skills of MSc students that are required by special scientific laboratories of universities and industry. The main criteria, appeared upon the stage, lie, first of all, in their important interrelation between the science and manufacturing as well as in the link of modern physics with new research methods and techniques, modern physical equipment, methods of conducting a complex physical experiment. Their content corresponds to the basic principles of accessibility didactics, systemic content, scientific quality, use of visual methods, professionalism, etc.

The expediency of studying this discipline in a number of laboratories united by the subject of research and complexity of equipment is demonstrated. The importance of conducting an experiment in different laboratories is highlighted. It is indicated the way to conduct the study of physical properties by complementary methods. The importance and efficiency of using the acquired knowledge and skills in both the education process and the production process is emphasized.

For the first time, the authors developed the experimental and theoretical basis for the discipline "Special Physical Practicum", which consists of laboratory practices grouped by the subject of research. Laboratory works of SFP discipline are located in separate laboratories, namely: "Laboratory of the investigation of electrophysical properties of semiconductors", "Laboratory of optics of semiconductor surface", "Laboratory of infrared spectroscopy", "Laboratory of solid state physics", "Laboratory of physical processing experiment".

It is shown that the equipment used in SFP laboratories is the main analytical tool among modern methods of research of semiconductors with different levels of doping, mobility and conductivity. The practical value of a laboratory practicum based on a non-destructive external IR-reflection method and the Hall method is demonstrated. The feasibility and effectiveness of using the acquired knowledge and skills, both in the educational process and in the production, is demonstrated. As an example, single crystals of 6H-SiC were used.

It is shown that the technical capabilities of SFP allow the mathematical processing of data on any computer linked to the Internet. In addition, opportunities for the integration of distance learning with the combination of experimental research and theoretical data processing, as well as virtual collaboration, are provided in the future collaboration of the MSc students and the teacher. It is established that the introduction of the modern scientific complex into the educational process in the form of a laboratory practicum can increase the level of theoretical knowledge of MSc students in the field of semiconductor physics, as well as allow them to acquire practical skills for further work in industry or for studying in PhD course.

Key words: *special laboratory practicum, IR spectroscopy, computer simulation, reflection spectrum, silicon carbide, Hall effect.*

Стаття надійшла до редакції 20.05.2018