

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**КРИВОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Фізико-математичний факультет**  
**Кафедра фізики та методики її навчання**

«Допущено до захисту»  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Коновал О.А.\_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище, ініціали)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Реєстраційний № \_\_\_\_\_  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**БАР'ЄРИ ТА ПЕРЕНОС НОСІВ У ДІОДНИХ СТРУКТУРАХ**

Магістерська робота студентки  
фізико-математичного факультету  
групи ФІ-м-13

Освітньо-кваліфікаційний рівень:  
другий рівень вищої освіти

Спеціальності:

014.08 Середня освіта (Фізика)

Додаткова спеціальність:

014.09 Середня освіта (Інформатика)

Науменко Марини Валеріївни

Керівник: доктор фізико-  
математичних наук, професор кафедри  
фізики та методики її навчання  
Балабай Руслана Михайлівна

Науменко М.В. Бар'єри та перенос носіїв у діодних структурах : магістерська робота студентки фізико-математичного факультету групи ФІ-м-13 / М. В. Науменко ; наук. керівник Р. М. Балабай. – Кривий Ріг, 2018. – 64 с.

**Анотація:**

Обговорена стратегія створення вбудованого латерального  $p-n$  – переходу у чорному фосфорені, використовуючи молекули бензил-віологена, як легуючу домішку частини поверхні чорного фосфору.

Досліджена стратегія створення на площині графену шляхом певних технологічних прийомів окремих ділянок локальної адсорбції різних хімічних елементів, що призводить до організації вбудованих латеральних  $p-n$  – переходів.

Методами функціоналу електронної густини та псевдопотенціалу із перших принципів на авторському програмному коді кафедри фізики та методики її навчання отримані просторові розподіли густини валентних електронів, густини електронних станів, ширини забороненої зони, кулонівські потенціали вздовж обраних напрямків досліджуваних структур, заряди на атомних остовах, побудовані енергетичні зонні діаграми бічних латеральних переходів на основі графену з різними областями хімічної функціоналізації.

Встановлено, що латеральна конфігурація з'єднання складових бічних латеральних переходів графен/графан (C/CH), графен/флюорографен (C/CF), графен/хлорографен (C/CCl) характеризуються перерозподіленими областями заряду різного знаку, які аналогічні областям виснаження домішок об'ємних  $p-n$  – переходів. Области з різними знаками створюють умови для появи скачків потенціалів, що є основною характеристикою  $p-n$  – переходу.

Розроблено семінарське заняття на тему «Латеральні двовимірні структури з діодними властивостями».

**Ключові слова:**

латеральні  $p-n$  – переходи, графен з локальною хімічною функціоналізацією, методи функціоналу електронної густини та псевдопотенціалу із перших принципів, перерозподіл заряду, потенціалний бар'єр.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
РОЗДІЛ 1. ТРИВИМІРНІ <i>P-N</i> – ПЕРЕХОДИ .....	7
1.1. Тривимірні <i>p-n</i> – переходи .....	7
Висновки до розділу 1 .....	18
РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ ДВОВИМІРНОГО (ЛАТЕРАЛЬНОГО) <i>P-N</i> – ПЕРЕХОДУ У ЧОРНОМУ ФОСФОРЕНІ .....	19
2.1. Створення латерального <i>p-n</i> – переходу у чорному фосфорені .....	19
Висновки до розділу 2 .....	26
РОЗДІЛ 3. ЛАТЕРАЛЬНІ ДВОВИМІРНІ СТРУКТУРИ З ДІОДНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ НА ОСНОВІ ГРАФЕНУ .....	27
3.1. Методи функціоналу електронної густини та псевдопотенціалу із перших принципів для обчислення електронних характеристик латеральних двовимірних структур .....	27
3.2. Модельні об'єкти та результати обчислень електронних характеристик латеральних двовимірних структур на основі графену .....	29
Висновки до розділу 3 .....	37
РОЗДІЛ 4. ПЕДАГОГІЧНЕ ТА МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВЧАННЯ НА СЕМІНАРСЬКЕ ЗАНЯТТЯ У ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДАХ....	38
4.1. Педагогічне забезпечення семінарських занять .....	38
4.2. Методичне забезпечення навчання на семінарське заняття та підготовка до нього .....	41
4.3. Розробка семінарського заняття на тему «Латеральні двовимірні структури з діодними властивостями» .....	51
Висновки до розділу 4 .....	55
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58

## ВСТУП

Двовимірні матеріали (2D) є перспективними у використанні в електронних пристроях наступного покоління (графен, гексагональний нітрид бору, діхалькогеніди перехідних металів, чорний фосфорен). Вони демонструють високу рухливість носіїв, високий вихідний коефіцієнт струму та чудове зчеплення, що передбачає споживання малої потужності та створення гнучкої електроніки [1]. 2D матеріали універсальні для створення гетеропереходів різної конфігурації. Так, добре відомі вертикальні гетеропереходи. Вони виявляють цікаві властивості, такі як нетипова область виснаження, міжшаровий екситонний зв'язок, керуємих затвором транспорт носіїв тощо [2]. Але недавні експериментальні успіхи викликали інтерес до бічних латеральних 2D переходів. Так, прикладаючи зовнішню напругу, можна індукувати p-n перехід на графені [3]. Щодо вбудованих переходів, створені майже ідеальний бічний контакт графен|h-BN, бічні з'єднання 2D діхалькогенідів перехідних металів, у яких відсутні проблеми механічно перенесених вертикальних гетеропереходів (обірвані зв'язки та адсорбати на межі розділу) [4]. У роботі [5] повідомлялося про епітаксіальне вирощування в два етапи бокового  $WSe_2$  (селенід вольфрам) -  $MoS_2$  (дісульфід молібден) гетеропереходу, де край  $WSe_2$  (селенід вольфрама) ініціює епітаксіальний ріст  $MoS_2$  (дісульфід молібдену), незважаючи на велику невідповідність решіток. 2D латеральні структури набувають все більшої популярності завдяки атомно-різкій границі поділу з ковалентними зв'язками та легшому налаштуванню скачка зон у бічному з'єднанні. Використовуючи скануючу силову мікроскопію, авторами [6,7] було визначено вбудований профіль заряду та довжину виснаження в 2D латеральному гетеропереході. Створюючи на площині графену шляхом певних технологічних прийомів окремі ділянки локальної адсорбції різних хімічних елементів (функціоналізація), можна організувати латеральні 2D гетероструктури на спільній вуглецевій основі. Ці діодні структури повинні задовольняти конкретним вимогам практичного застосування. Для цього повинні бути наперед досліджені підходи до створення

2D латеральних  $p-n$  – переходів.

**Актуальність обраної теми** полягає у тому, що моделювання на атомарному рівні двовимірних бічних переходів на графені з різними областями функціоналізації методом функціоналу електронної густини дасть можливість встановити особливості перерозподілу заряду між областями межі переходу, що приводить до зсуву енергетичних зон, врівноваження рівнів Фермі та утворення потенціальних бар'єрів. Аналіз унікальної геометрії компланарних інтерфейсів дасть можливість визначити оптимальні параметри двовимірних діодних структур.

**Об'єктом дослідження** даної роботи є бічні компланарні 2D переходи.

**Предметом дослідження** є компланарні двовимірні структури з діодними властивостями.

**Мета роботи** – теоретичне дослідження переходів на листі графену з різними областями функціоналізації щодо виявлення в них внутрішніх  $p-n$  – переходів, що формуються без зовнішнього амбіполярного впливу.

**Завдання дослідження:**

Проаналізувати властивості тривимірного контакту двох напівпровідників одного виду з різним типом провідності.

Обробити наукову літературу, яка носить у собі відомості про створення та властивості бічних латеральних 2D переходів.

Розробити атомні моделі компланарних гетеропереходів різного хімічного складу.

Обчислити із застосуванням сучасних методів квантової фізики твердого тіла для нанооб'єктів характеристики енергетичних зон, функцій розподілу електричного потенціалу та густини заряду в бічних переходах із напівпровідників (графан, флоран, хлоран) та напівметалу (графен).

Зробити висновки щодо електронних властивостей зазначених структур.

Розробити семінарське заняття та провести його теоретичний аналіз.

Дана робота приймала участь у II турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з природничих, технічних та гуманітарних робіт.

**Особистий внесок магістрантки.** Робота є узагальненням результатів досліджень, отриманих автором особисто та за його безпосередньої участі. Огляд літератури, переклади з англійської мови, розробка семінарського заняття виконані особисто. Розробка моделей, проведення обчислювальних експериментів здійснювались разом із керівником.

## РОЗДІЛ 1. ТРИВИМІРНІ $P-N$ – ПЕРЕХОДИ

### 1.1. Тривимірні $p-n$ – переходи

Контакт двох напівпровідників одного виду з різним типом провідності приводить до створення на його межі електронно-діркового або  $p-n$  – переходу.

Існує ряд методів створення  $p-n$  – переходів (сплавлення, витягування кристала, дифузія та інші), що дозволяють створити різноманітні за структурою і фізичними властивостями переходи. Умовно  $p-n$  – переходи можна поділити на різкі і плавні, а також на симетричні і несиметричні.

Різкий перехід (рис 1.1 (a), (b)) характеризується стрибкоподібною конфігурацією концентрацій донорів і акцепторів на межі поділу середовищ з різним типом електропровідності. Для простоти аналізу будемо вважати концентрацію акцепторів  $n_a$  в напівпровіднику  $p$ -типу рівній концентрації донорів  $n_{дон}$  в напівпровіднику  $n$ -типу, прийmemo її чисельно рівній  $10^{22} \text{ м}^{-3}$ . Будемо вважати, що температура не дуже низька, так що всі домішкові атоми (донорні і акцепторні) повністю іонізовані (температура виснаження домішки у германію при  $n_{дон} = 10^{22} \text{ м}^{-3}$  дорівнює 32 К). Це дозволяє прийняти концентрацію електронів в напівпровіднику  $n$ -типу за межами  $p-n$  – переходу рівній  $n_n = n_{дон} = 10^{22} \text{ м}^{-3}$  і таку ж величину приписати концентрації дірок  $p_p$  в напівпровіднику  $p$ -типу поза  $p-n$  – переходу. Концентрація неосновних носіїв заряду в двох напівпровідниках  $p_n = n_p = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ . Градієнт концентрацій дірок і спрямований у протилежну сторону градієнту концентрації електронів, що викликає дифузійні потоки носіїв заряду – перетікання дірок з напівпровідника  $p$ -типу в напівпровідник  $n$ -типу і електронів з напівпровідника  $n$ -типу в напівпровідник  $p$ -типу.

Таким чином, в зоні контакту створюється область деякої протяжності  $d$  (рис 1.1 (c)), в якій проходить поступова зміна концентрацій електронів і дірок.

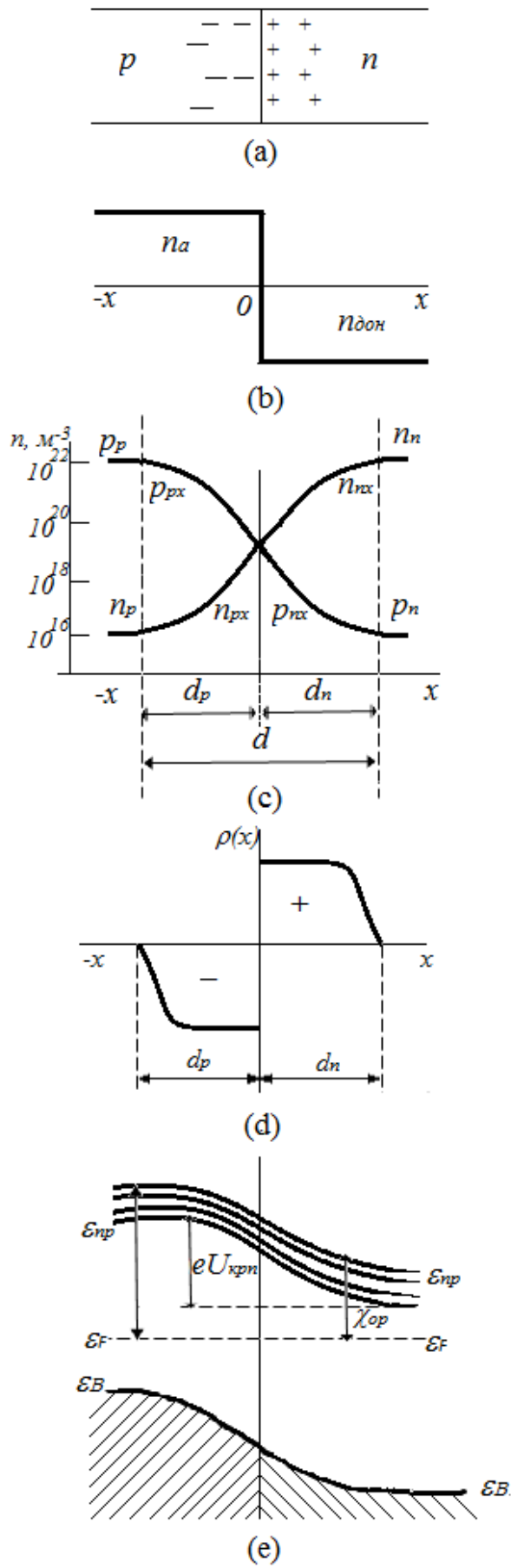


Рис 1.1. Різкий  $p-n$  – перехід: (а) контакт областей з різним типом



електропровідності; (b) розподіл концентрацій домішок; (c) розподіл концентрації носіїв заряду; (d) розподіл густини об'ємного заряду нерухомих іонів; (e) енергетична діаграма  $p-n$  – переходу.

Вихід дірок з напівпровідника  $p$ -типу призводить до виникнення в ньому області некомпенсованого негативного об'ємного заряду нерухомих іонізованих акцепторів. Відповідно вихід електронів з напівпровідника  $n$ -типу викликає появи в ньому області некомпенсованого позитивного об'ємного заряду нерухомих іонізованих донорів. На рис. 1.1 (d) зображено розподіл густини об'ємного заряду  $\rho(x)$  в зоні контакту.

Некомпенсовані об'ємні заряди, що тягнуться на відстані  $d_p$  і  $d_n$ , створюють електричне поле, яке обумовлює зустрічні по відношенню до дифузійним дрейфові потоки електронів і дірок. В рівноважному стані дифузійні і дрейфові потоки взаємно компенсуються. На енергетичних діаграмах дію цього поля характеризує підйом енергетичних рівнів в напівпровіднику  $p$ -типу з вигином вниз в області  $d_p$  і опусканням енергетичних рівнів в напівпровіднику  $n$ -типу з вигином вгору в області  $d_p$ . При цьому рівноважному стану відповідає розташування рівня Фермі на одній висоті у всіх ділянках напівпровідників. Відповідна сталому рівноважному стану енергетична діаграма  $p-n$  – переходу приведена на рис. 1.1 (e). З малюнку видно, що висота потенціального бар'єру  $p-n$  – переходу дорівнює

$$eU_{кpn} = \chi_{0p} - \chi_{0n} = \varepsilon_{Fn} - \varepsilon_{Fp} \quad (1.1)$$

Для оцінки факторів, що впливають на висоту потенціального бар'єру  $p-n$  – переходу запишемо вирази для концентрації електронів зоні провідності за межами областей об'ємних зарядів напівпровідників  $n$ - і  $p$ -типів:

$$n_n = N_e e^{-\frac{\varepsilon_{npn} - \varepsilon_{Fn}}{kT}} \quad (1.2)$$

$$n_p = N_e e^{-\frac{\varepsilon_{npp} - \varepsilon_{Fp}}{kT}} \quad (1.3)$$

Замінив в (1.3)  $\varepsilon_{Fp}$  відповідно з (1.1) на  $\varepsilon_{Fn} - eU_{xpn}$  і вирішуючи рівняння спільно з (1.2), отримаємо

$$U_{xpn} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_p}. \quad (1.4)$$

Це рівняння показує, що потенціальний бар'єр  $p-n$  – переходу тим вище, чим сильніше розрізняються концентрації носіїв одного знаку в  $n$ - і  $p$ - ділянках контакту.

Для оцінки характеру зміни потенціалу в  $p-n$  – переході звернемося до рівняння Пуассона:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon\varepsilon_0}. \quad (1.5)$$

Домовлено вважати, що температурний режим відповідає повній іонізації донорів і акцепторів. Припустимо також, що з шару  $d_p$  в результаті дифузії виходять всі дірки, а з шару  $d_n$  – всі електрони. Таким чином, для  $p$ -області ( $x < 0$ )

$$\rho_p(x) \approx \text{const} = -en_a = -ep_p \quad (1.6)$$

і для  $n$ -області ( $x > 0$ )

$$\rho_n(x) \approx \text{const} = en_{\text{дон}} = en_n. \quad (1.7)$$

Підстановка цих густин некомпенсованих об'ємних зарядів в рівнянні Пуассона дає

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = -\frac{ep_p}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad \text{для } x < 0, \quad (1.8)$$

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = -\frac{en_n}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad \text{для } x > 0. \quad (1.9)$$

Прийнявши за початок відліку потенціалу його значення в напівпровіднику  $n$ -типу за межами шару об'ємного заряду  $d_n$ , можна під час відсутності електричних полів поза  $p-n$  – переходу сформулювати граничні умови для двох рівнянь: при  $x = -d_p$ ,  $U = U_{xpn}$  і  $\frac{dU}{dx} = 0$ , а при  $x = d_n$ ,  $U = 0$  і  $\frac{dU}{dx} = 0$ .

Рішення рівнянь з урахуванням цих граничних умов призводить до вираження:

для області об'ємного заряду напівпровідника  $n$ -типу

$$U = U_{\text{хрп}} - \frac{e}{2\varepsilon\varepsilon_0} p_p (d_p - x)^2, \quad (1.10)$$

для області об'ємного заряду напівпровідника  $p$ -типу

$$U = \frac{e}{2\varepsilon\varepsilon_0} n_n (d_n - x)^2. \quad (1.11)$$

Очевидно, при  $x=0$  два рішення повинні дати одне і те ж значення потенціалу  $U$  і його похідної  $\frac{dU}{dx}$ . Тоді, продиференціювавши (1.10) і (1.11) і прирівнявши похідні при  $x=0$ , отримаємо

$$\frac{d_n}{d_p} = \frac{p_p}{n_n}. \quad (1.12)$$

Це співвідношення показує, що протяжності областей об'ємного заряду в напівпровідниках  $n$ -і  $p$ -типів обернено пропорційні концентраціям їх основних носіїв (акцепторів і донорів).

Просте арифметичне перетворення співвідношення (1.12) дозволяє записати

$$\frac{d_n}{d} = \frac{p_p}{p_p + n_n} \quad \text{і} \quad \frac{d_p}{d} = \frac{n_n}{n_n + p_p}. \quad (1.13)$$

Прирівнявши значення  $U$  при  $x=0$  з (1.10) і (1.11) і використавши співвідношення (1.13), можна знайти загальну товщину області об'ємних зарядів.

Підкреслимо ще раз, що глибина проникнення контактної області більша в тій області напівпровідника, де менша концентрація носіїв заряду. Якщо, наприклад, контактує дуже слабо легований напівпровідник  $n$ -типу з сильно легованим напівпровідником  $p$ -типу, то практично вся область об'ємних зарядів локалізується в напівпровіднику  $n$ -типу. При цьому рівняння (1.13) має вигляд:

$$d \approx d_n = \left( \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U_{\text{хрп}}}{en_n} \right)^{1/2}. \quad (1.14)$$

Плавний перехід характеризується поступовою (на ділянці значною протяжності) зміною концентрації домішок. Товщина області об'ємних зарядів

$d$  при цьому менше протяжності ділянки зміни концентрації домішок. Тому величина  $d$  і її складові  $d_p$  і  $d_n$  залежать не стільки від кінцевих значень  $n_n$  і  $p_p$  концентрації електронів і дірок (донорів і акцепторів) за межами ділянки зміни концентрації домішок, скільки від закону зміни концентрації домішок поблизу межі розділу областей з різними типами електропровідності (такою межею є площина  $x=0$  в якій  $n_{дон} = n_a$ ). Наприклад, при дифузійному методі введення домішки, тобто створення плавного  $p-n$  – переходу, закон зміни концентрації домішок (експоненціальний) поблизу межі розділу можна вважати лінійним, формула має вигляд

$$n_{доміш\ x} = n_{дон\ x} - n_{ax} = ax \quad (1.15)$$

Коефіцієнт  $a$  називають градієнтом концентрації домішок. Очевидно,  $p-n$  – перехід при цьому виявляється симетричним, тобто  $d_p = d_n$ .

Рішення рівняння Пуассона для цього випадку (вважаючи, як і вище, повну іонізацію домішкових атомів) дає вираження для товщини області об'ємних зарядів:

$$d = d_p + d_n = \left( \frac{12\epsilon\epsilon_0}{ea} U_{кpn} \right)^{1/3}, \quad (1.16)$$

яке показує, що проникнення контактного поля в напівпровідники тим слабше, чим вищий градієнт концентрацій домішків [47].

Область об'ємних зарядів називають збідненим шаром, маючи на увазі різко знижену концентрацію рухомих носіїв в обох її частинах. Тому вона є найбільш високоомною частиною всього  $p-n$  – переходу. У більшості випадків повністю нехтують наявністю вільних носіїв в переході і вважають його межі ідеально різкими. Така ідеалізація спрощує вирішення багатьох завдань.

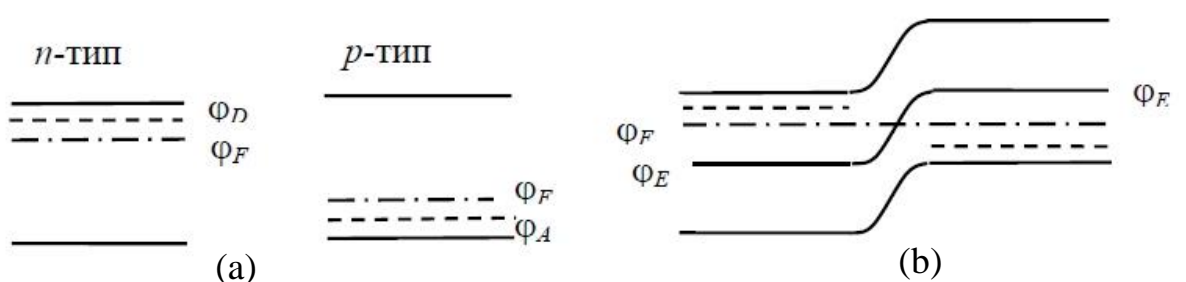


Рис. 1.2. Зонна діаграма напівпровідників і  $p-n$  – переходу в рівноважному стані

Вважається, що  $p-n$  – перехід в цілому електрично нейтральний: негативний заряд іонів акцепторів дорівнює позитивному заряду іонів донорів. Також електрично нейтральні  $p$ - і  $n$ -області, в яких сумарний заряд вільних електронів дорівнює заряду іонів донорів і заряд дірок дорівнює сумарному заряду іонів акцепторів.

На рис. 1.2 показані енергетичні зонні діаграми напівпровідників  $p$ -і  $n$ -типу до і після контакту. Вимога єдності рівня Фермі в контактуючих шарах призводить до викривлення енергетичних зон в  $p-n$  – переході. В результаті утворюється потенціальний бар'єр.

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) ідеального діода з  $p-n$  – переходом, що відображає його основні властивості, була отримана У. Шоклі і розрахована шляхом вирішення рівняння безперервності, яке пов'язує концентрацію носіїв заряду в будь-якій частині напівпровідника з параметрами електричного поля в ньому, швидкістю генерації та рекомбінації носіїв заряду, процесом дифузії носіїв і часом. Основними спрощеннями, зробленими при побудові математичної моделі діода, були наступні: товщина  $p-n$  – переходу дорівнює нулю; генераційні і рекомбінаційні процеси як в області переходу, так і в об'ємі напівпровідника відсутні; відсутні явища пробою  $p-n$  – переходу і поверхневі стани; не враховується омичний опір об'єму напівпровідника.

У результаті вжитих спрощень рівняння безперервності зводяться до рівнянням дифузії і відповідне наближення називається дифузійним наближенням. При цьому інтерес представляють тільки надлишкові концентрації, що виникають внаслідок інжекції носіїв заряду через  $p-n$  – перехід, і достатньо записати лише одне з двох рівнянь, оскільки друге дає такий же результат в силу умови нейтральності ( $\Delta n = \Delta p$ ).

З урахуванням усіх прийнятих припущень для електронного напівпровідника маємо

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n-n_0}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}, \quad (1.17)$$

Введем величину

$$L_n = (D_n \cdot \tau_n)^{1/2}. \quad (1.18)$$

Це так звана дифузійна довжина. Вона характеризує ту відстань, на яку носії заряду встигають продифундувати за час життя. Дифузійна довжина – одна з фундаментальних величин в фізиці напівпровідників.

Знайдемо надлишкову концентрацію  $\Delta n = n - n_0$ . Поділимо обидві частини (1.17) на  $D_n$ . Тоді рівняння дифузії приймає вид

$$\frac{\partial^2 (\Delta n)}{\partial x^2} - \frac{\Delta n}{L^2} = \frac{1}{D_n} \frac{\partial (\Delta n)}{\partial t}. \quad (1.19)$$

Стаціонарний варіант рівняння виходить, якщо в правій частині покласти  $\frac{\partial (\Delta n)}{\partial t} = 0$

$$\frac{\partial^2 (\Delta n)}{\partial x^2} - \frac{\Delta n}{L^2} = 0. \quad (1.20)$$

Рівняння (1.19) – це лінійне диференціальне рівняння 2-го порядку в частинних похідних. Загальне рішення його представляє собою суму експонент:

$$\Delta n(x) = A_1 e^{\frac{x}{L_n}} + A_2 e^{-\frac{x}{L_n}}, \quad (1.21)$$

де коефіцієнти  $A_1$  і  $A_2$  визначаються з граничних умов.

При  $x \rightarrow \infty$ ,  $\Delta n \rightarrow 0$ , тобто далеко від інжектуючої поверхні, надлишкова концентрація відсутня і напівпровідник перебуває в рівноважному стані. При цьому гранична умови  $A_1 = 0$ . При  $x = 0$  отримуємо  $A_2 = \Delta n(0)$ , отже, розподіл надлишкової концентрації експоненціальне:

$$\Delta n(x) = \Delta n(0) e^{-\frac{x}{L_n}}. \quad (1.22)$$

З цього виразу випливає, що на відстані дифузійної довжини надлишкова концентрація зменшується в  $e$  раз. На відстані  $(3-4)L$  надлишкова концентрація зменшується в 20-50 разів, тобто стає порівняно малою проти граничної.

Обчислимо граничний градієнт концентрації носіїв заряду: диференціюючи отримаємо

$$\frac{\partial(\Delta n)}{\partial x} = \frac{\Delta n(0)}{L_n} e^{-\frac{x}{L_n}} \quad (1.23)$$

З (1.23) випливає, що градієнт концентрації, а значить, і дифузійний струм спадають у міру віддалення від інжектуючої поверхні. Градієнт має максимальне (по модулю) значення при  $x = 0$ , тобто на інжектуючій поверхні

$$\left. \frac{\partial(\Delta n)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{\Delta n(0)}{L_n} \quad (1.24)$$

У загальному випадку струм через перехід складається з електронної та діркової складових, які з урахуванням прийнятих спрощень є чисто дифузійними (рис. 1.3).

Сумарна густина дифузійного струму розраховується за формулою

$$j = j_n + j_p = -eD_n \frac{\partial n}{\partial x} + eD_p \frac{\partial p}{\partial x}.$$

Запишемо градієнти концентрацій для діркового і дифузійного струму

$$\left. \frac{\partial(\Delta n)}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{\Delta n}{L_n}; \quad \left. \frac{\partial(\Delta p)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{\Delta p_n}{L_p} \quad (1.25)$$

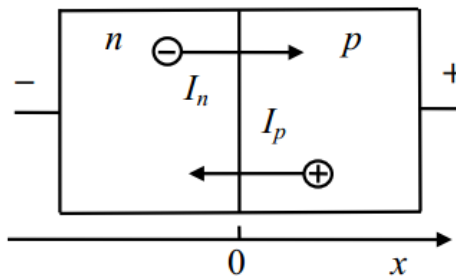


Рис. 1.3. Структура струму в  $p-n$  – переході в дифузійному наближенні

Знак плюс для діркового градієнта обумовлений тим, що дірки інжектується в напрямку негативних значень  $x$  (рис. 1.3).

Розглянемо  $p-n$  – перехід при прямій і зворотній напрузі. При подачі прямої напруги на  $p-n$  – перехід залежність  $I_d = f(U_d)$  настільки доступний, що отримати потрібний струм, задаючи пряму напругу дуже важко: найменша зміна напруги викликає експоненціальну зміну струму. Тому для  $p-n$  – переходу

характерний режим заданого прямого струму. Щоб дослідити залежність  $U \propto f(I \propto)$ , запишемо ВАХ в такій формі:

$$U = \varphi_T \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right) \quad (1.26)$$

Для кремнієвих діодів через малу величину теплового струму можна скористатися спрощеним виразом

$$U = \varphi_T \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1.27)$$

Якщо діапазон зміни прямих струмів становить два і більше порядків, то пряма напруга може змінюватися суттєво. На практиці діапазон зміни прямих струмів рідко буває таким широким. Тоді пряма напруга змінюється незначно.

Залежно від діапазону струмів прямі напруги на  $p-n$  – переході трохи відрізняються, але в межах діапазону їх можна вважати постійними і розглядати як параметр відкритого переходу. Розрізняють нормальний режим, коли прямий струм через перехід має величину порядку міліампера і падіння напруги на кремнієвому переході  $U \approx 0,7$  В, і мікрорежим, коли прямий струм порядку мікроампера і падіння напруги на переході  $U \approx 0,5$  В.

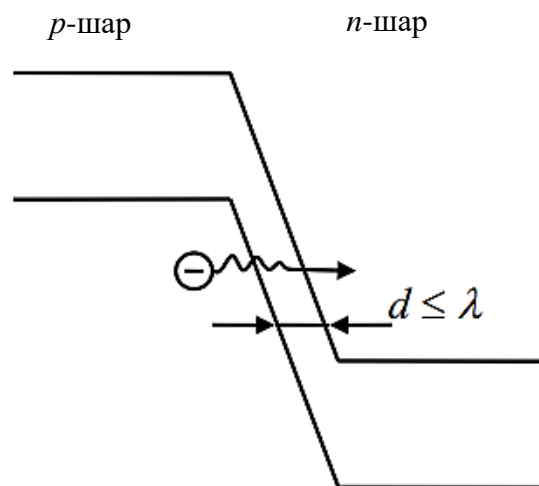


Рис 1.4. Зонна діаграма тунельного пробію

Величина струму насичення ідеального  $p-n$  – переходу не залежить від напруги. Реальний зворотний струм переходу може набагато перевершувати величину струму насичення. Причиною цього може бути генерація електронно-



діркових пар в області зворотно зміщеного  $p-n$  – переходу. У рівноважному стані процеси генерації і рекомбінації врівноважують один одного. У разі застосування зворотної напруги область переходу додатково збіднюється носіями і процес стає невривноваженим. Надлишкові носії несуться електричним полем в нейтральні шари, утворюючи струм термогенерації, який перевершує струм насичення на кілька порядків.

При досить великій напруженості електричного поля в зворотно зміщеному  $p-n$  – переході може виникнути пробій. Розрізняють три види (механізму) пробою: тунельний, лавинний і тепловий.

В основі тунельного пробою лежить тунельний ефект, який виникає у разі, коли геометрична ширина потенціального бар'єру ( $p-n$  – переходу) стає порівняннн з довжиною хвилі де Бройля електрона і електрони з заповнених енергетичних станів у зоні провідності переходять на вільні стани в валентній зоні (рис. 1.4).

Лавинний пробій виникає в сильному електричному полі, що має місце в області  $p-n$  – переходу, коли електрон на довжині вільного пробігу набирає енергію, рівну або більшу ширини забороненої зони, і іонізує атом власного напівпровідника. В результаті народжується пара електрон-дірка, і процес повторюється вже за участю нових носіїв.

В основі теплового пробою лежить саморозігрів переходу при протіканні зворотного струму. Із зростанням температури зворотний струм зростає, відповідно збільшується потужність, що розсіюється в переході, це викликає додаткове зростання температури та інші. Характерною особливістю ВАХ при тепловому пробіі є наявність ділянки з негативним диференціальним опором:  $dU/dI < 0$  [38].

## Висновки до розділу 1

Контакт двох напівпровідників одного виду з різним типом провідності приводить до виникнення електронно-діркового або  $p-n$  – переходу.

Існує ряд методів створення  $p-n$  – переходів (сплавлення, витягування кристала, дифузія та інші), що дозволяють створити різноманітні за структурою і фізичними властивостями переходи.

Різкий  $p-n$  перехід характеризується стрибкоподібною конфігурацією концентрацій донорів і акцепторів, концентрацій основних та неосновних носіїв заряду в двох напівпровідниках на межі поділу середовищ з різним типом електропровідності, що викликає дифузійні потоки носіїв заряду – перетікання дірок з напівпровідника  $p$ -типу в напівпровідник  $n$ -типу і електронів з напівпровідника  $n$ -типу в напівпровідник  $p$ -типу та створення областей об'ємного заряду некомпенсованих іонів домішок, внутрішнього електричного поля, яке обумовлює зустрічні по відношенню до дифузійним дрейфові потоки електронів і дірок. В рівноважному стані дифузійні і дрейфові потоки взаємно компенсуються.

Вимога єдності рівня Фермі в контактуючих шарах призводить до викривлення енергетичних зон в  $p-n$  – переході. В результаті утворюється потенціальний бар'єр.

Вольт-амперна характеристика ідеального діода з  $p-n$  – переходом розраховується шляхом вирішення рівняння безперервності, яке пов'язує концентрацію носіїв заряду в будь-якій частині напівпровідника з параметрами електричного поля в ньому, швидкістю генерації та рекомбінації носіїв заряду, процесом дифузії носіїв і часом.

## РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ ДВОВИМІРНОГО (ЛАТЕРАЛЬНОГО) P-N – ПЕРЕХОДУ У ЧОРНОМУ ФОСФОРЕНІ

### 2.1. Створення латерального *p-n* – переходу у чорному фосфорені

Двовимірні матеріали є перспективними в якості нових базових будівельних блоків приладів наноелектроніки. Для того, щоб використати їх унікальні властивості в реальних пристроях, 2D матеріали повинні сполучатися з іншими системами, тобто, бути з'єднаними з електродами або один з одним. Постійне розширення доступності експериментальних тестів і підвищення якості зразків, спонукає теоретичні дослідження властивостей бічних переходів взагалі і конкретних структур, що утворені з наявних 2D матеріалів.

Щільний контакт двох матеріалів у гетероструктурі дозволяє обмін носіями, що врівноважує рівні Фермі, а також перебудовує електронні зони. У 3D-переході формується подвійний електричний шар, котрий є достатньо локальним, але займає суцільну площину, що робить його достатнім для створення глобальних вбудованих потенціальних сходинок  $\Delta\phi$ , таких що  $\Delta E_F - \Delta\phi = 0$ , де  $\Delta E_F$  є різниця рівнів Фермі матеріалів до контакту (надалі елементарний заряд електрона вважається рівним одиниці, тому енергія і електростатичний потенціал є однакової розмірності). Подвійний електричний шар містить також сильно локалізовані диполі, спричинені присутніми інтерфейсними станами, область, що повністю збіднена рухливими носіями; існує також область переходу [8] між областями, виснаженими від носіїв зарядів, і нейтральним матеріалом вдалині від контакту. У 3D випадку перехідна область дуже вузька, що виправдовує добре відоме наближення різкого збідненого шару [8,9]. У двовимірному бічному переході обмін зарядами утворює подвійний шар, який не є площиною, а лише дипольними лініями, чий електростатичні потенціали, очевидно, згасають з відстанню як  $x^{-1}$  і не можуть створити глобальний стрибок потенціалу  $\Delta\phi$ , необхідний для урівноваження носіїв [10]. Тобто, будь-які інтерфейсні хімічні диполі не

можуть привести до зсуву зон на 2D-переході [11,12] і закріплення рівня Фермі, при цьому, пригнічується [13]. Скоріш всього, в цьому випадку необхідний перерозподіл делокалізованих зарядів [10] для формування глобального потенціального стрибка  $\Delta\phi$  та врівноваження рівня Фермі через 2D-перехід.

Легування молекулами є гнучким та ефективним способом перерозподілу заряду та моделювання електронних властивостей 2D-матеріалів [12-16]. Наприклад, у роботі [17] описані процеси легування *n*-типу кількшарового чорного фосфору (ЧФ), використовуючи бензил-віологен (БВ) для перенесення поверхневого заряду. На підставі відомих відновлювально-окислювальних потенціалів для БВ [14] (- 0,79 V відносно стандартного водневого електроду (СВЕ) для  $\text{BV}^0/\text{BV}^+$  та - 0,30 V відносно СВЕ для  $\text{BV}^+/\text{BV}^{2+}$ , відповідно), та положенню мінімуму зони провідності (МЗП) і максимуму валентної зони (МВЗ) для об'ємного ЧФ [18], рис. 2.1 (а). зображена енергетична структура кількшарового ЧФ та БВ. Незважаючи на те, що МВЗ та МЗП у кількшаровому ЧФ будуть відрізнятися від моношару ЧФ (заборонена зона кількшарового ЧФ є вужчою, ніж моношарового ЧФ), відновлювальні потенціали БВ знаходяться на вищому енергетичному рівні, ніж МЗП кількшарового ЧФ. У результаті рівень Фермі зміщується до мінімуму зони провідності, а плоска зона з'являється трохи нижче рівня Фермі після легування молекулами БВ. Плоскі зони можуть діяти як донорські стани в легованій БВ системі фосфору, як показано на рис. 2.1 (b). Крім того, для досягнення глибшого розуміння електронних властивостей фосфору, легованого БВ, автори [17] також визначили відповідний профіль електронної густини на максимумі валентної зони (МВЗ) та донорного стану одношарового фосфору, легованого БВ, як показано на рис. 2.1 (c) та (d), відповідно. Ефективний електронний перенос та неглибокий донорний рівень вказують на те, що БВ, як типова донорська добавка в фосфоровій системі, може утворювати напівпровідник *n*-типу.

У експериментах роботи [17] відновлений БВ синтезувався та виділявся з використанням двофазної системи толуол-віологен, розчинений у воді [20]. Вихід молекул підтверджувався спектрами поглинання, де інтенсивність піку при  $\sim 405$  нм змінювалася, але його зміщення за різних концентрацій БВ не відбувалося. Кілька шарів чорного фосфорена з підкладки  $\text{SiO}_2(285 \text{ нм})/\text{Si}$  знімали за допомогою модифікованого методу механічного відшарування, ідентифікували за допомогою оптичної мікроскопії та характеризували із використанням атомно-силового мікроскопа (АСМ) [21]. Польовий транзистор з чорного фосфорену створювався із застосуванням стандартного електронно-променевого випаровування після процесу фотолітографії. Кількашаровий чорний фосфорен є нестійким у повітрі та у воді, у зв'язку з цим авторами роботи [17] було використано високу концентрацію проявника ( $> 75\%$ ) і уникали надмірного проявлення фоторезисту. Для отримання латерального  $p$ - $n$  переходу в каналі вони спершу покривали половину ділянки чорного фосфорену оксидом  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , який окислювався на місці, внаслідок внесення термічно випарених 10 нм алюмінію у збагачене киснем середовище на 6 годин, тоді як інша частина пристрою була захищена фоторезистом. Зображення АСМ і рентгенівської фотоемісійної спектроскопії (РФС) показали, що за допомогою цієї простої стратегії, отримується однорідна плівка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Потім фоторезист видаляли ацетоном і зразок зберігали у вакуумній камері перед подальшою обробкою. У кінці пристрій занурювали в розчин БВ (у толуолі), і молекули БВ адсорбувалися відкритою поверхнею, утворюючи  $p$ - $n$  – перехід, тоді як область, вкрита  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $p$ -типу) залишалася незмінною.

Кілька шарів ЧФ площиною  $20\text{мм}\cdot 1,4\text{мм}$  відшарувалися від основного кристалу ЧФ і переносилися на сильно леговану кремнієву підкладку, покриту 285 нм шаром  $\text{SiO}_2$ . Товщина сколу становила  $\sim 2,9$  нм (5 шарів), і оцінювалася із використанням атомно-силового мікроскопа (АСМ). Спектр Рамана ділянки каналу подвійного польового транзистора на основі ЧФ, зображений на рис. 2. 1 (е). Піки при  $\sim 361 \text{ см}^{-1}$ ,  $\sim 440 \text{ см}^{-1}$ ,  $\sim 468 \text{ см}^{-1}$  походять від коливань кристалічної решітки, що пояснюється  $A^1_g$ ,  $B^1_g$  та  $A^2_g$  фононними модами,

добре узгоджуються із спектроскопією Рамана в об'ємному чорному фосфорені [19], та нещодавніми дослідженнями одно- та кількшарового фосфорену [20, 21, 22].

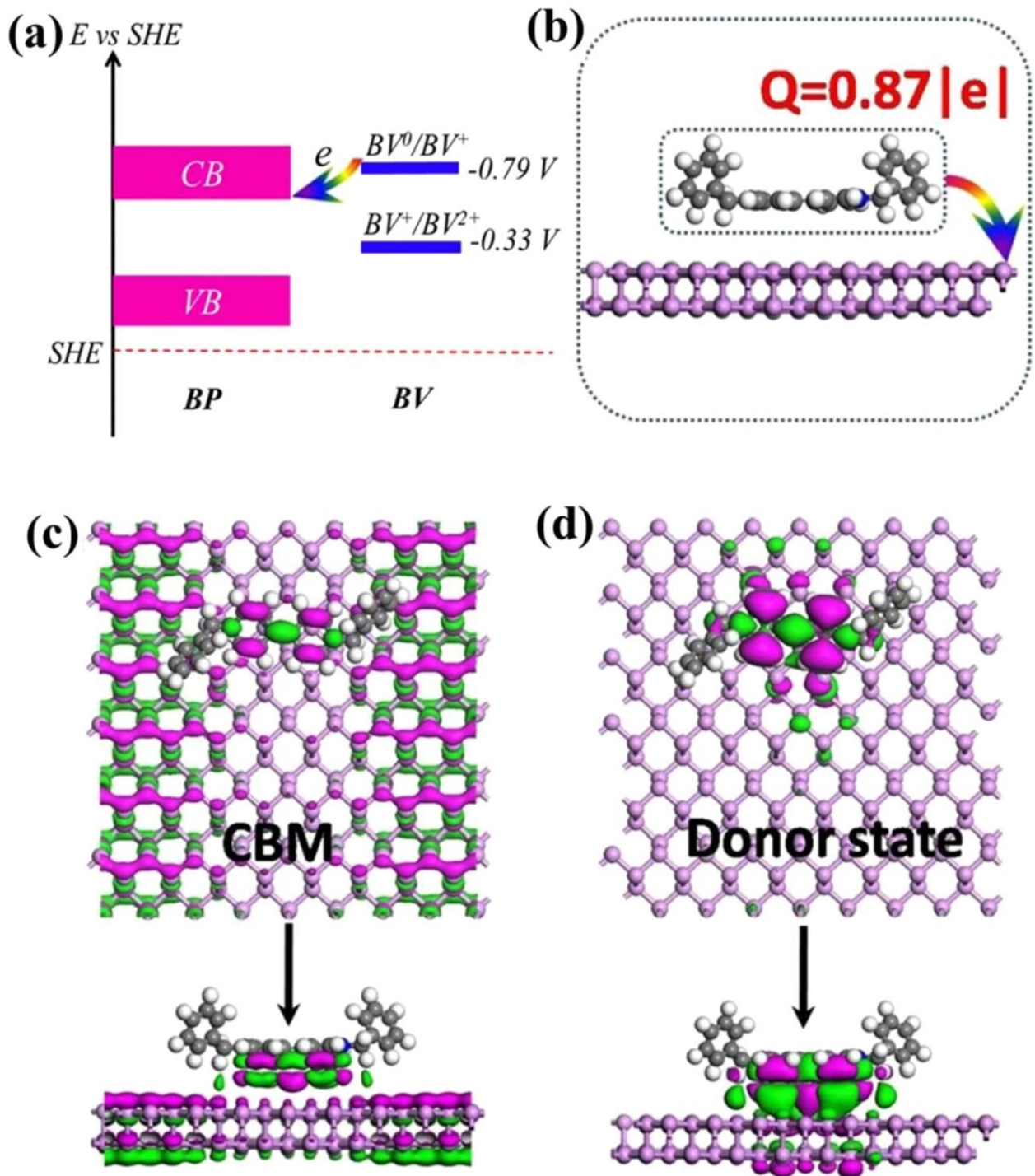


Рис. 2.1. Механізм хімічного легування чорного фосфорену n-типу. (а) Відносне вирівнювання зони молекули BV та фосфорену, що відповідає стандартному водневому електроду (СВЕ). (b) Кількість заряду, перенесена з

молекули БВ на фосфорен. Профіль електронної густини, що відповідає мінімуму зони провідності (МЗП) та донорному стану моношару фосфрену легованого БВ. (с) Парціальна густина заряду, що відповідає мінімуму зони провідності і (d) донорний стан моношару фосфрену легованого БВ [17]

Залежність  $I$  від  $V$  кількешарового ЧФ польового транзистора демонструє типову поведінку транзистора (р-типу), як показано на рис. 2.2 (а) та (б). Струм стоку змінюється лінійно при невеликих зміщеннях між стоком і витокком, що вказує на Шотки-подібний контакт на поверхні розділу метал/ЧФ. Рухливість носіїв була розрахована наступним чином:

$$\mu = \frac{L}{W \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d}} \cdot \frac{dI_d}{dV_g} \cdot \frac{1}{V_d} \quad (2.1)$$

де  $L = 1,7$  мкм,  $W = 1,4$  мкм і  $d = 285$  нм позначають довжину, ширину та товщину каналу  $\text{SiO}_2$  (285 нм у експериментах [17]), відповідно.  $V_d$ ,  $I_d$  та  $V_b$  позначають зміщення між стоком і витокком, та напругу на нижньому затворі в лінійній області кривої  $I_d$ - $V_g$ .  $\epsilon_0$  та  $\epsilon_r$  - вакуумна діелектрична стала та діелектрична стала  $\text{SiO}_2$  ( $\epsilon_r = 3.9$ ), відповідно. Розрахована авторами [17] рухливість пристрою становила близько  $180 \text{ см}^2/\text{В}$ , що наближається до величин, отриманих у інших роботах [22-25]. Концентрація дірок була оцінена також за наступною формулою:

$$n = - \frac{C_i (V_g - V_{th})}{e} \quad (2.2)$$

де  $C_i$  - ємність на одиницю площі між ЧФ і нижнім затвором, задана  $C_i = \epsilon_0 \epsilon_r / d$ , а  $V_{th}$  - порогова напруга пристрою. Наприклад, концентрація електронів при зміщенні у  $V_g = 60$  В була оцінена як  $\sim 2,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , що набагато вище, ніж отримана у р-п переходах двозатворного польового транзистора на основі ЧФ [26] та р-п – переходах на основі  $\text{WSe}_2$  [27]. Це демонструє унікальні переваги стратегії хімічного легування, запропонованої в роботі [17].

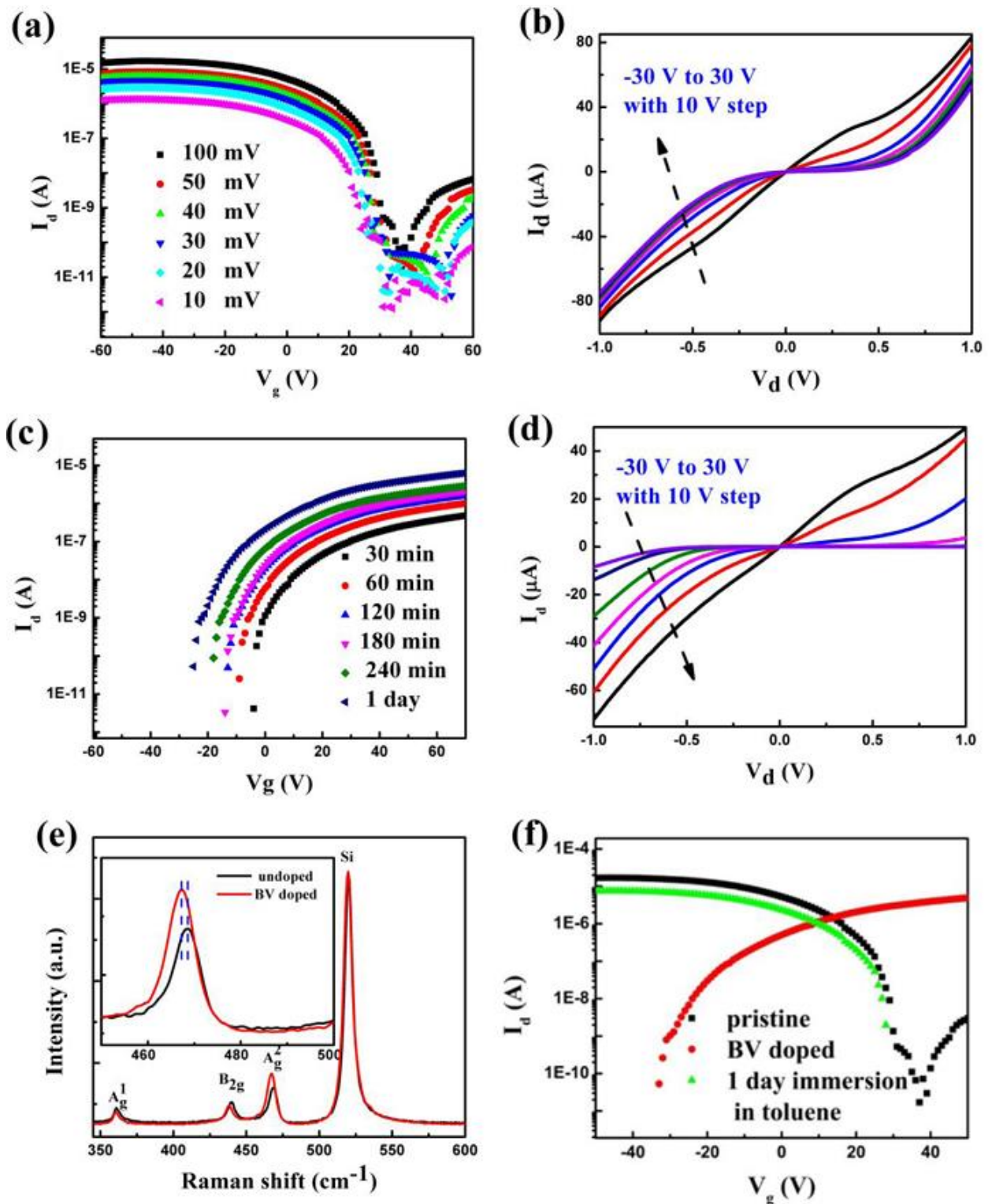


Рис. 2.2. Ефект легування чорного фосфору молекулами БВ. (а) Характерні залежності струму витoku-стоку ( $I_d$ ) від напруги затвору ( $V_g$ ) ЧФ польового транзистора, виміряних за вказаних напруг струму витoku-стоку ( $V_d$ ). (б) Струм витoku-стоку ( $I_d$ ) проти напруги витoku-стоку ( $V_d$ ) ЧФ польового транзистора, зареєстрований за різних напруг управління ( $V_g$ ), в діапазоні від -



30 В до 30 В із кроком 10 В. (с) Характерна крива струму виток-стоку ( $I_d$ ) проти напруги затвору ( $V_g$ ) БВ-легованого ЧФ польового транзистора з різними періодами легування. (d) Струм виток-стоку ( $I_d$ ) проти напруги виток-стоку ( $V_d$ ) ЧФ польового транзистора, зареєстрований за різних напруг керування ( $V_g$ ), в діапазоні від -30 В до 30 В із кроком 10 В, час легування для цього вимірювання 60 хв. (е) Спектр Рамана луски ЧФ перед (нелігований, чорна крива) та після легування з БВ за 60 хв (лігований, червона крива). (f) Зворотність ефекту легування чорного фосфору з БВ [17]

Ще однією унікальною властивістю цього методу є те, що молекулу БВ можна десорбувати зануренням у розчин толуолу. Молекули легуючих речовин поступово десорбуються з поверхні та розчиняються в толуолі після занурення протягом 24 годин, а ефекти легування повертаються у початковий стан, як показано на рис 2.2 (f). Залежність рухливості від часу легування та зворотності ефекту легування вказує на те, що тип і концентрація носіїв можуть бути контрольовано спроектовані за допомогою кількості і часу додавання домішків, що відкриває перспективу виготовлення чорного фосфору  $n$ -типу та подальших  $p$ - $n$  – переходів у каналі.

## Висновки до розділу 2

Чорний фосфорен (ЧФ) – природний двовимірний матеріал, є привабливим для використання в електроніці та фотоніці завдяки унікальній площинній анізотропії, залежній від товщини матеріалу, прямої забороненої енергетичної зони та високій рухливості носіїв. Він добре підходить для оптоелектроніки ближньої та середньої інфрачервоної області поляризованого спектра, завдяки відносно вузькій забороненій зоні та асиметричній структурі.

Легування *n*-типу кількшарового чорного фосфору можливе, використовуючи типовий бензил-віологен (БВ) для перерозподілу поверхневого заряду, як показано в роботі [17].

Для отримання латерального *p-n* – переходу в каналі, спершу покривають частину ділянки чорного фосфору оксидом  $Al_2O_3$ , який окислювався на місці, внаслідок внесення термічно випарених 10 нм алюмінію у збагачене киснем середовище на 6 годин [17].

Кількшарові ЧФ фототранзистори з *p-n* – переходом, виготовлені частковим БВ легуванням, проявляють сильний випрямляючий струм.

Такий площинний *p-n* діод з ЧФ може бути використаний як фотоелектричний сонячний елемент з ефективністю перетворення енергії ~ 0,75%.

## РОЗДІЛ 3. ЛАТЕРАЛЬНІ ДВОВИМІРНІ СТРУКТУРИ З ДІОДНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ НА ОСНОВІ ГРАФЕНУ

### 3.1. Методи функціоналу електронної густини та псевдопотенціалу із перших принципів для обчислення електронних характеристик латеральних двовимірних структур

Основний стан електронної підсистеми нанооб'єктів встановлюються шляхом самоузгодженого розв'язування рівнянь Кона-Шема. Тому електронна густина виражалася у вигляді зайнятих ортонормованих одночастинкових хвильових функцій:

$$n(r) = \sum_i |\psi_i(r)|^2 \quad (3.1)$$

Точка на поверхні потенціальної енергії в наближенні Борна-Оппенгеймера визначалася мінімумом енергетичного функціоналу по відношенню до хвильових функцій:

$$E[\{\psi_i\}, \{R_j\}, \{\alpha_v\}] = \sum_i \int_{\Omega} d^3r \psi_i^*(r) \left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \right] \psi_i(r) + U[\{n(r)\}, \{R_j\}, \{\alpha_v\}] \quad (3.2)$$

де  $R_j$  – координати атомних остовів,  $\alpha_v$  – всі можливі зовнішні впливи на систему.

У загальноприйнятому формулюванні мінімізація енергетичного функціоналу (2/2) по відношенню до одночастинкових орбіталей при накладених на них додаткових умовах ортонормування приводить до одночастинкових рівнянь Кона-Шема:

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \frac{\partial U}{\partial n(r)} \right\} \psi_i(r) = \varepsilon_i \psi_i(r) \quad (3.3)$$

Розподіл електронів по енергіям отримався шляхом числового обчислення похідної  $\lim_{\Delta E \rightarrow 0} \Delta N / \Delta E$ , де  $\Delta N$  – кількість дозволених станів, що припадають на проміжок енергії  $\Delta E$ , із отриманого під час діагоналізації матриці Кона-Шема одночастинкового енергетичного спектра, кількість значень в якому контролюється розміром розкладу хвильової функції.

Відповідно до ідеології функціонала електронної густини кількість зайнятих станів при  $T = 0$  К визначалися половиною кількістю електронів у атомному базисі (у зв'язку з неврахуванням спіну електрона) [38].

Кулонівський потенціал в обраному напрямку розраховувався за формулою:

$$V_h(G) = \frac{4\pi e^2 \rho(G)}{G^2}, \quad (3.4)$$

де  $\rho(G)$  – Фур'є-компоненти електронної густини:

$$\rho(G) = \frac{2}{N_T} \sum_k \sum_j^{CC} \sum_{\alpha \in T} \sum_{G'} b_j^*(k + G' + \alpha G) b_j(k + G') \quad (3.5)$$

де  $j$  означає додавання по всіх зайнятих станах,  $N_T$  - число операторів  $\alpha$  в точковій групі  $T$  і множник 2 враховує виродження по спіну. Розроблені атомні базиси для всіх об'єктів обчислення мали симетрію, що містила в своїй точковій групі всього дві операції: тотожне та інверсне перетворення, яке забезпечує дійсність усіх отриманих величин.

Результатом розрахунків електронної структури багатоатомної системи в межах теорії функціонала електронної густини є електронна густина (3.1), котра є неперервною величиною, нормованою на повну кількість електронів в системі – у нашому випадку на повну кількість електронів в одиничній комірці суперрешітки. Для оцінки перерозподілу електронного заряду між атомами розраховувався вираз в околі атома  $\alpha$  об'ємом  $V$ :

$$q_\alpha = Z_\alpha - \int_{V_\alpha} n(r) d^3. \quad (3.6)$$

### 3.2. Модельні об'єкти та результати обчислень електронних характеристик латеральних двовимірних структур на основі графену

Зміна електронних характеристик напівметалу графена досягається функціоналізацією, котра може бути виконана різними способами [28], один з яких полягає в адсорбції атомів або молекул. Залежно від міцності хімічного зв'язку розрізняють фізичну та хімічну адсорбцію. Фізична залишає структуру графена в практично незмінному вигляді, проте може викликати деякі тонкі електронні зміни. Хімічна, навпаки, супроводжується сильними ковалентними зв'язками між атомами карбону та адсорбату. Ці ковалентні зв'язки руйнують хімічну структуру в графені та спричиняють сильні структурні зміни.

До функціоналізованих графенових структур належать графан [28-30], флюорографен [28-32], хлорографен [28, 34, 35], які мають подібну структуру. Графан – клас гідрогінезованих графенових структур, в якому кожен атом карбону графенового шару ковалентно пов'язаний з атомом гідрогену з типом зв'язку  $sp^3$ . Графан може існувати в різних конфігураціях, серед найбільш відомих – «крісло», «човен», «стремено». Автори [28] стверджують, що найбільш стабільною є конфігурація «крісло», при якій атоми гідрогену поперемінно адсорбуються вище і нижче площини графена таким чином, що всі атоми карбону з однієї підгратки переміщуються вгору, в той час як атоми з іншої підгратки переміщуються вниз (див. рис. 3.1).

Флюорографен і хлорографен мають аналогічну структуру та тип гібридизації [28]. Атомна структура графану, флюорографену та хлорографену зображена на рис. 3.1.

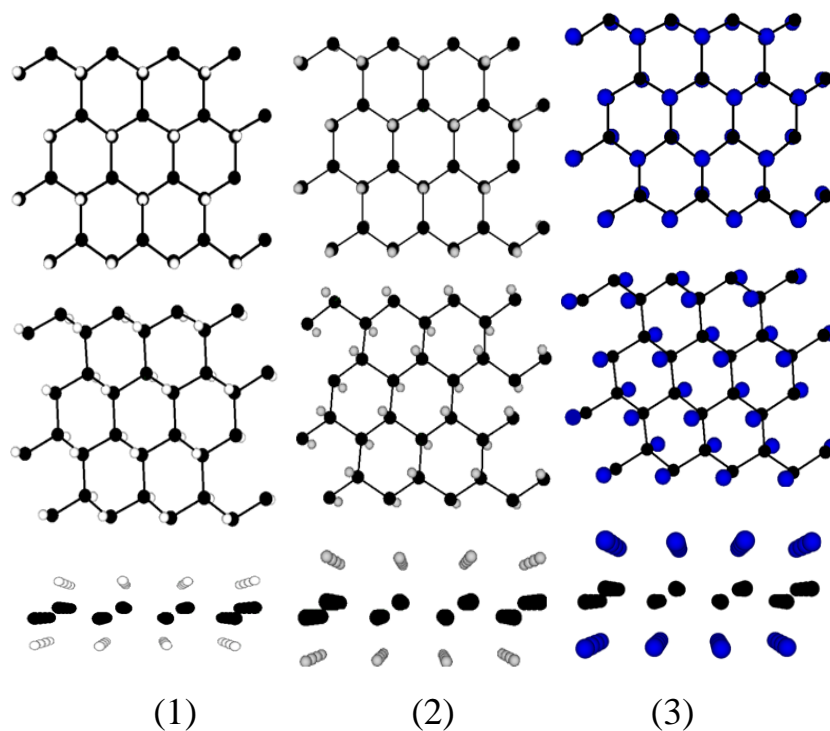


Рис. 3.1. Атомні структури графану (1), флюорографену (2) та хлорографену (3): вид зверху, вид з іншого ракурсу, вид збоку

Зміну гібридизації від  $sp^2$  до  $sp^3$  при функціоналізації графену ілюструють рис. 3.2 – рис. 3.2.5. Так, на рис 3.2.2 розподіл густини плаский, а на рис. 3.3 – рис. 3.5 розподіл набуває тривимірних форм. При цьому розподіл густини на хлорографені відрізняється від графану та флюорографені.

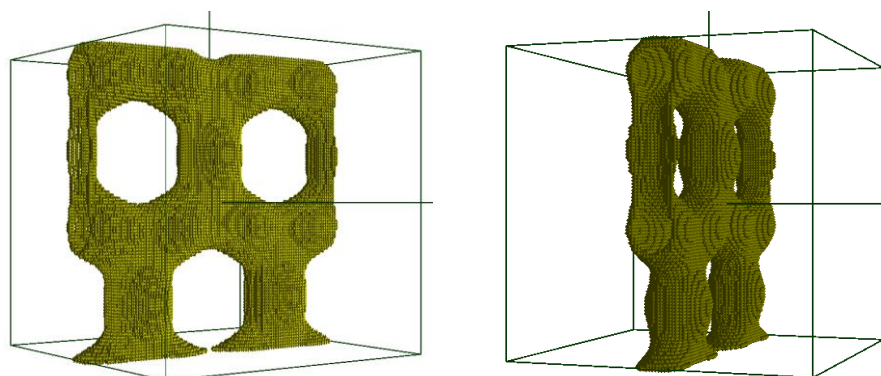


Рис. 3.2. Гексагональна структура  $sp^2$ -гібридизації атомів карбону

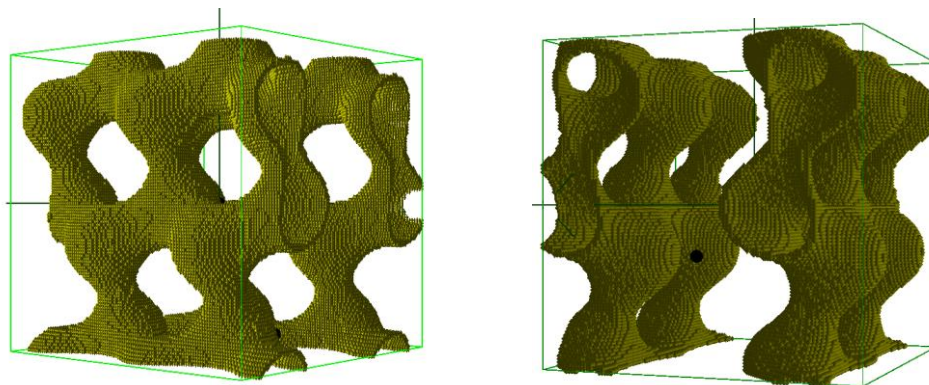


Рис. 3.3. Трансформація густини валентних електронів до  $sp^3$ -гібридизації атомів карбону при гідрогенізації (графан)

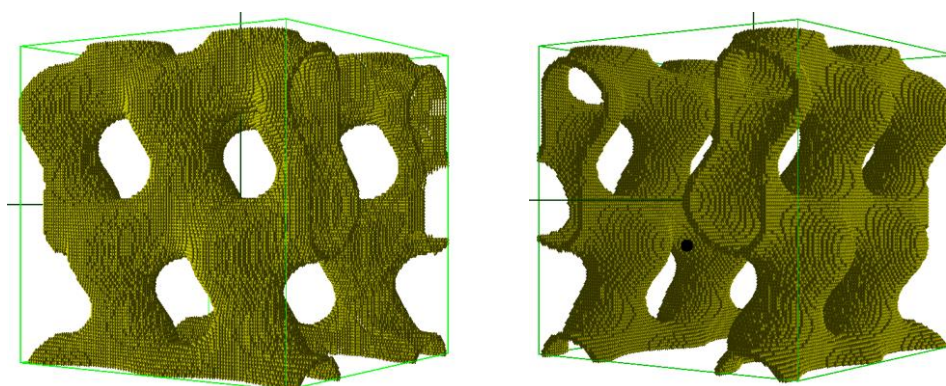


Рис. 3.4. Трансформація до  $sp^3$ -гібридизації атомів карбону при фторонізації (флюорографен)

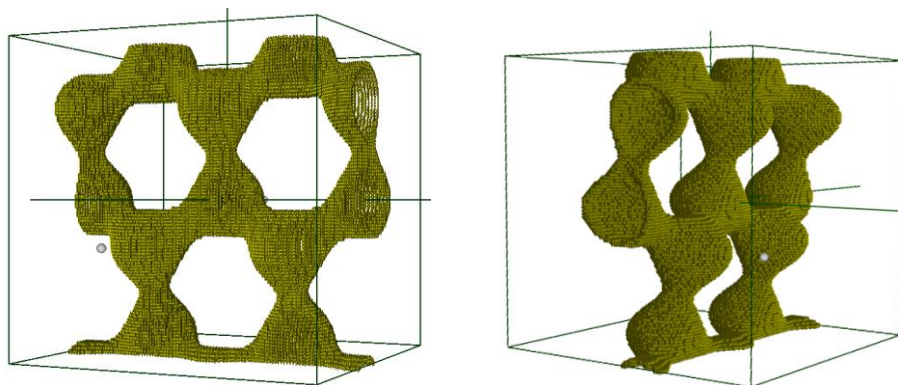


Рис. 3.5. Трансформація до  $sp^3$ -гібридизації атомів карбону при хлоронізації (хлорографен)

В табл. 3.1 наведені структурні параметри вуглецевих систем, де  $a_{cc}$  – довжина зв'язку між атомами С,  $a_{cx}$  – довжина зв'язку між атомом С та

адсорбатом,  $\alpha_c$  – кут між лініями зв'язку атомів С,  $\delta$  – просідання відносно площини графену атомів С під дією адсорбата [14, 15].

Табл. 3.1. Структурні параметри вуглецевих систем

№	об'єкт	$a_{cc}, \text{Å}$	$a_{cx}, \text{Å}$	$\alpha_c$	$\delta, \text{Å}$
1	графен(C)	1,42	-	120°	-
2	графан(CH)	1,52	1,12	112°	0,45
3	флюорографен(CF)	1,55	1,37	111°	0,49
4	хлорографен(CCl)	1,72	1,73	112°	0,49

Для чисельного дослідження електронних властивостей бічних переходів на графені з різними областями функціоналізації розроблялись такі модельні об'єкти.

У розрахунках використовувався прийом побудови штучної суперрешітки. Тому в досліджувані атомні системи вводилася штучна трансляційна симетрія шляхом побудови суперрешітки з примітивною коміркою тетрагонального типу, атомний базис якої містить повну інформацію про систему. Комірка транлювалася по трьом напрямкам:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Завдяки цьому прийому вдалось відтворити нескінченні площини графену, графану, флюорографену, хлорографену без взаємодії між комірками. Вид об'єктів обчислень, описаних нижче, наводиться на рис. 3.6:

- об'єкт 1: лист графену, умовне позначення (C), розмір комірки:  $a = 2,46 \text{ Å}$ ,  $b = 4,26 \text{ Å}$ ,  $c = 2,65 \text{ Å}$ ; 4 атоми С у базисі;
- об'єкт 2: лист графану, умовне позначення (CH), розмір комірки:  $a = 2,52 \text{ Å}$ ,  $b = 4,56 \text{ Å}$ ,  $c = 3,18 \text{ Å}$ ; 4 атоми С та 4 атоми Н у базисі;
- об'єкт 3: лист флюорографену, умовне позначення (CF), розмір комірки:  $a = 2,55 \text{ Å}$ ,  $b = 4,65 \text{ Å}$ ,  $c = 3,70 \text{ Å}$ ; 4 атоми С та 4 атоми F;
- об'єкт 4: лист хлорографену, умовне позначення (CCl), розмір комірки:  $a = 2,85 \text{ Å}$ ,  $b = 5,16 \text{ Å}$ ,  $c = 4,76 \text{ Å}$ ; 4 атоми С та 4 атоми Cl.



- об'єкт 5: бічний планарний перехід графену та графану; умовне позначення (C/CH); розмір комірки  $a = 13,23 \text{ \AA}$ ;  $b = 10,58 \text{ \AA}$ ;  $c = 5,29 \text{ \AA}$ ; базис містив 48 атоми, з яких 32 атоми C та 16 атомів H;
- об'єкт 6: бічний планарний перехід графену та флюорографену; умовне позначення (C/CF); розмір комірки  $a = 13,76 \text{ \AA}$ ;  $b = 11,11 \text{ \AA}$ ;  $c = 6,88 \text{ \AA}$ ; базис містив 48 атоми, з яких 32 атоми C та 16 атомів F;
- об'єкт 7: бічний планарний перехід графену та хлорографену; умовне позначення (C/CCl); розмір комірки  $a = 15,35 \text{ \AA}$ ;  $b = 12,70 \text{ \AA}$ ;  $c = 7,41 \text{ \AA}$ ; базис містив 48 атоми, з яких 32 атоми C та 16 атомів Cl [39].

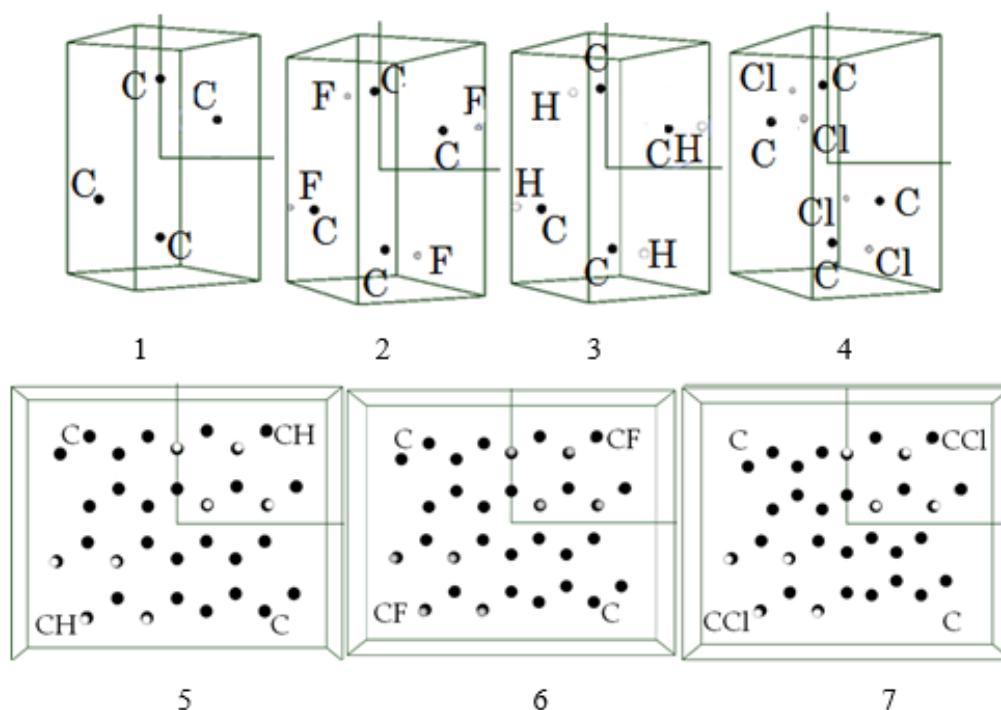


Рис 3.6. Об'єкти обчислень

Отримані розподіли планарного заряду бічних латеральних переходів графен/графан, графен/флюорографен, графен/хлорографен (рис. 3.7, рис. 3.8). У переході графен/графан спостерігається чітке перерозподілення областей заряду різного знаку. У переході графен/флюорографен це перерозподілення є менш помітним. А у переході графен/хлорографен воно взагалі відсутнє. Чисельні значення зарядів проілюстровані картами просторового розподілу електронної густини валентних електронів для ізозначення 0,9-1,0; 0,5-0,6; 0,1-

0,2 від максимального (зліва направо) у структурі бічних планарних переходів C/CH, C/CF, C/CCl.

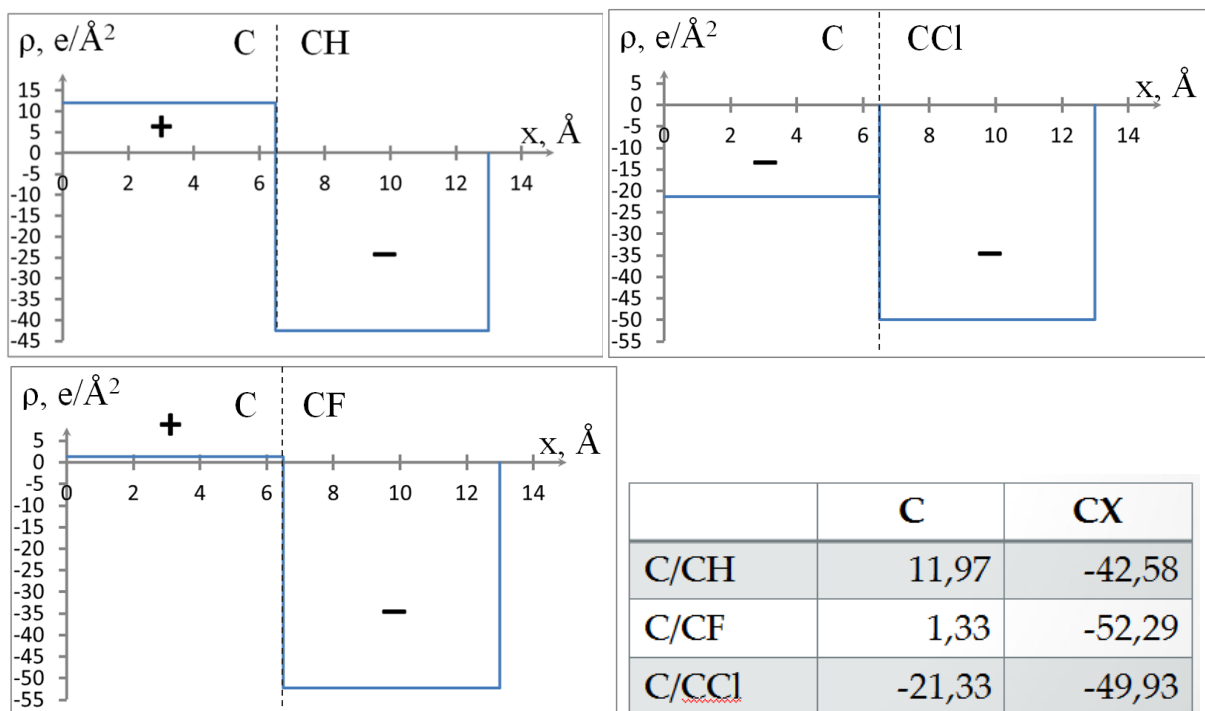


Рис. 3.7. Розподіли планарного заряду бічних латеральних переходів графен/графан, графен/флюорографен, графен/хлорографен

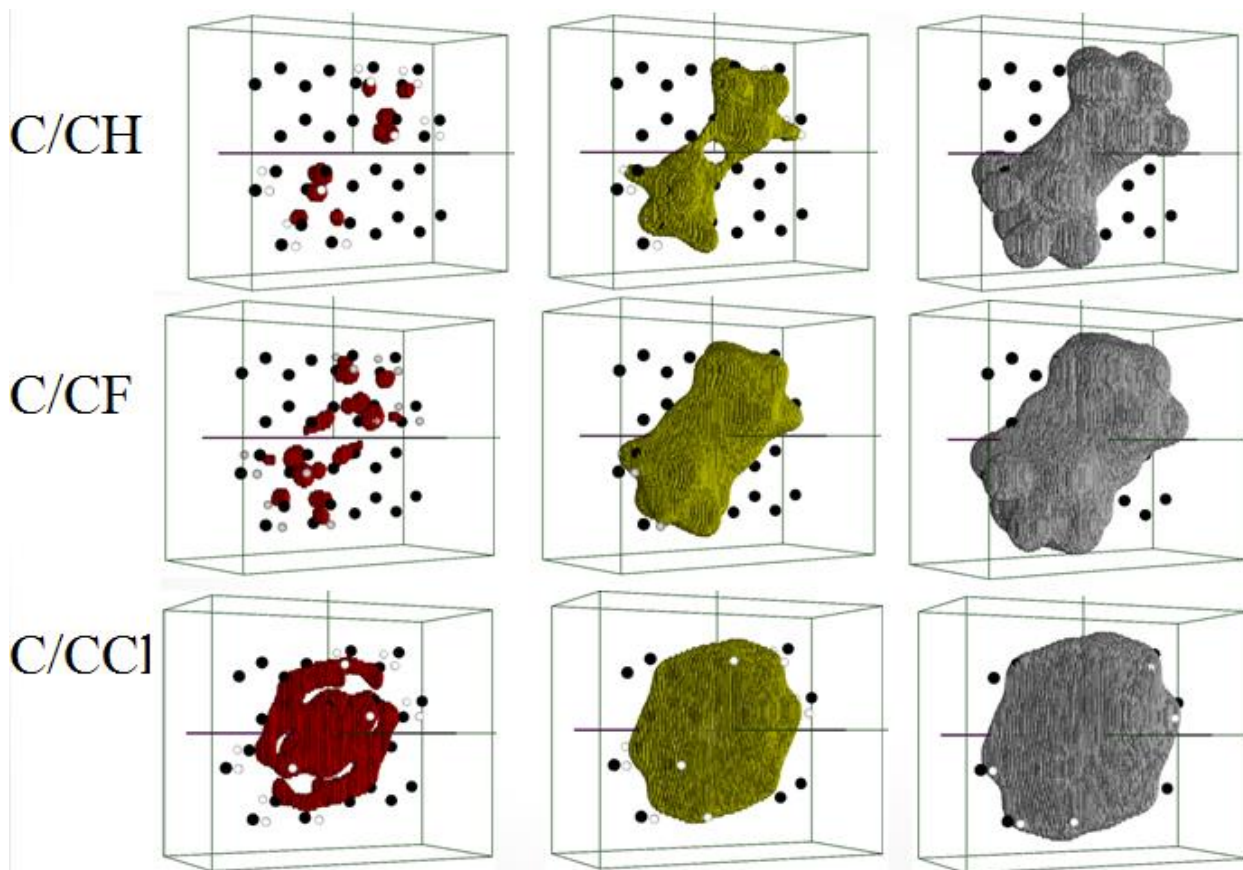


Рис. 3.8. Просторові розподіли валентних електронів у бічних латеральних

переходах графен/графан, графен/флюорографен, графен/хлорографен для різних ізо-значень [37]

Наявність в гетеропереходах областей із зарядами різних знаків призводить до формування потенціальних бар'єрів (рис. 3.9). Хоча при цьому величини кулонівських потенціалів цих бар'єрів мають такі значення: найбільший скачок потенціалу має перехід графен/флюорографен  $\Delta V=26,4$  а.о., дещо менший у переході графен/хлорографен -  $\Delta V=25,5$  а. о., а перехід графен/графан має найменший скачок -  $\Delta V=20,9$  а.о.

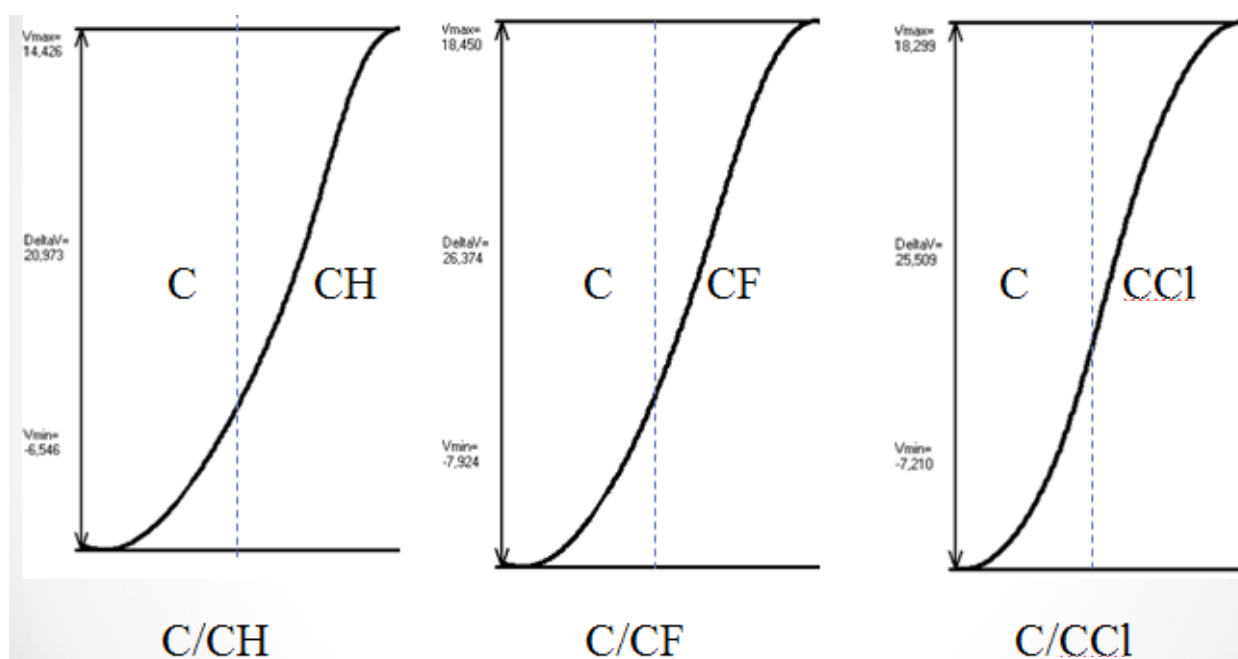


Рис. 3.9. Потенціальні бар'єри, сформовані у бічних латеральних переходах графен/графан, графен/флюорографен, графен/хлорографен (вертикальна пунктирна лінія позначає границю розділу у переходах)

Побудовані енергетичні зонні діаграми бічних латеральних переходів нескінченних площин графена та графана, графена та флюорографена, графена та хлорографена (перший стовбець рис. 3.10), а також зонні діаграми відповідних бічних латеральних переходів кінцевих розмірів (другий стовбець рис. 3.10). Звернемо увагу на першу зонну діаграму першого стовпця: зонні структури графену та графану були підраховані окремо, після чого були

поєднані на границі розділу. На діаграмі рівні  $E_v$  та  $E_c$  графану лежать значно вище ніж ці рівні в графені. Аналогічна ситуація в другій і третій діаграмах першого стовпця. Тепер звернемо увагу на першу зонну діаграму другого стовпця. Крім зонних структур графену і графану кінцевих розмірів, на діаграмі приводиться рівень Фермі, який ототожнюється зі стелею валентної зони бічного латерального переходу C/CH, тобто спільний рівень Фермі гетеропереходу. У переході C/CH рівень Фермі потрапляє в зону провідності, в переходах C/CF та C/CCl – у валентну зону.

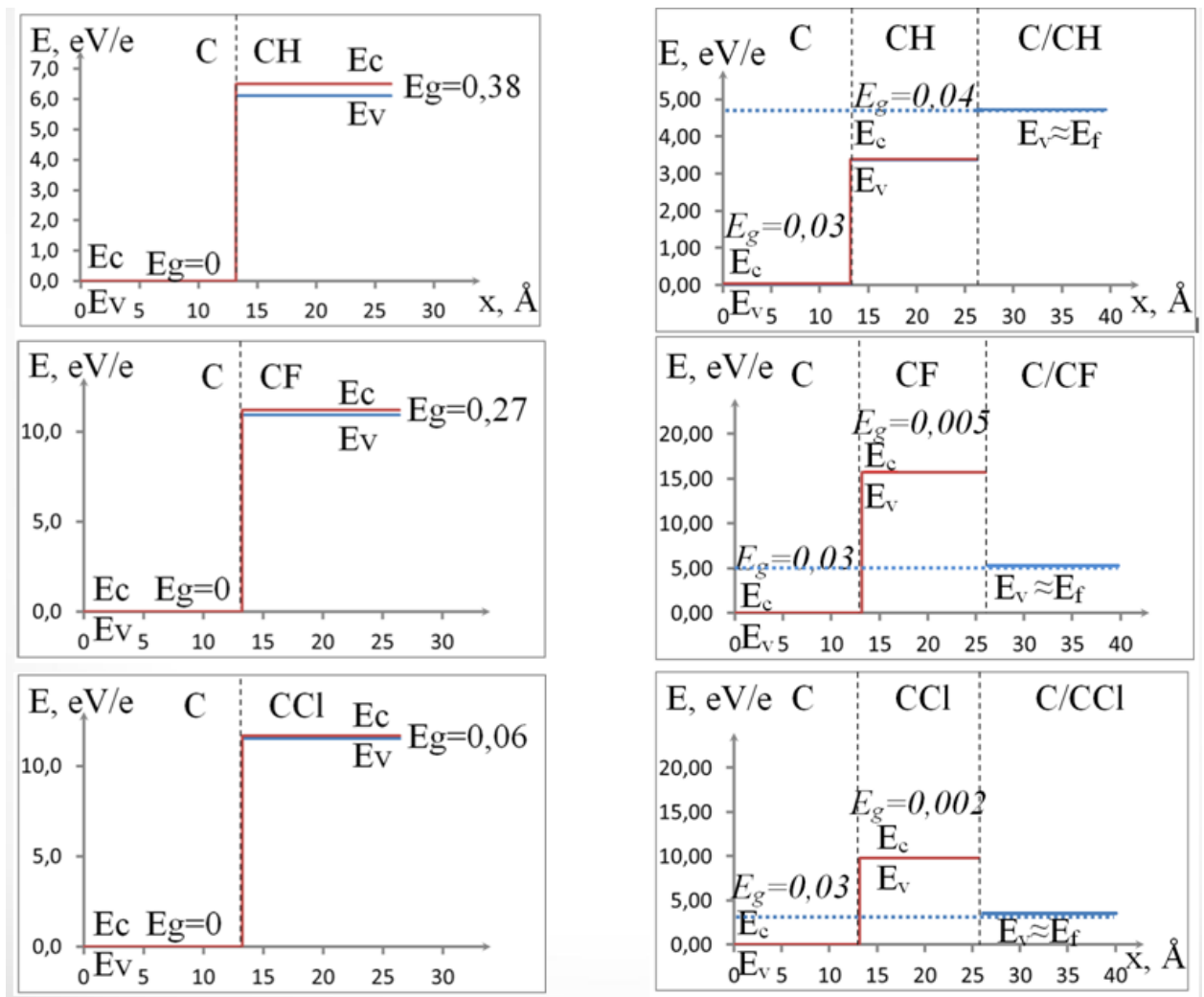


Рис. 3.10. Енергетичні зонні діаграми бічних латеральних переходів нескінченних площин графена та графана, графена та флюорографена, графена та хлорографена (перший стовбець). Зонні діаграми відповідних бічних латеральних переходів кінцевих розмірів (другий стовбець) [36]

### Висновки до розділу 3

Методом функціоналу електронної густини та псевдопотенціалу із перших принципів на авторському програмному коді кафедри фізики та методики її навчання були отримані просторові розподіли густини валентних електронів, густини електронних станів, ширини забороненої зони, кулонівські потенціали вздовж обраних напрямків досліджуваних структур, заряди на атомних остовах, побудовані енергетичні зонні діаграми бічних латеральних переходів на основі графена.

Латеральна конфігурація з'єднання складових 2D гетероструктур призводить до перерозподілу носіїв через їх бічну границю поділу без перенесення заряду між утвореними адсорбатами ділянками. При цьому, такі 2D латеральні гетеропереходи характеризуються перерозподіленими областями заряду різного знаку, які аналогічні областям виснаження домішок об'ємних  $p$ - $n$  переходів.

Області з різними знаками створюють умови для появи скачків потенціалів, що є основною характеристикою  $p$ - $n$  – переходу.

Отже, створюючи на площині графену шляхом певних технологічних прийомів окремі ділянки локальної адсорбції різних хімічних елементів, можна організувати вбудовані  $p$ - $n$  – переходи.

## **РОЗДІЛ 4. ПЕДАГОГІЧНЕ ТА МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВЧАННЯ НА СЕМІНАРСЬКЕ ЗАНЯТТЯ У ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДАХ**

### **4.1. Педагогічне забезпечення семінарських занять**

Педагогічна ефективність застосування семінарських занять доведена й обґрунтована в працях вітчизняних дидактів Б. П. Єсипова, В. В. Зав'ялова, В. П. Стрезікозіна, А. В. Усової та ін. У зарубіжних джерелах умовам ефективного застосування семінарських занять присвячені дослідження Дж. Трампа та Д. Бейнам [40].

Семінар – традиційна форма організації навчального процесу, в якому викладач взаємодіє із студентами, надає додаткову інформацію з питання, що розглядається, виявляє нові судження та умовиводи, накреслює шляхи вирішення проблеми на основі висловлених думок на мові конкретної науки та формулювання висновків, застосовується вміння аналізувати інформацію та її порівняння, вести дискусію в якості діалогу.

Семінарське заняття сприяє глибокому засвоєнню студентами теоретичних проблем, оволодіння науковим апаратом, формуванню у них навичок ораторського мистецтва, уміння аргументувати свої судження, вести наукову полеміку, захищати і відстоювати свою думку, зважаючи на думку іншої людини. Підготовка до семінарського заняття передбачає такі дії: опрацювання кількох джерел, виписування основних положень із посиланням на джерела, групування матеріалу за питаннями на окремих аркушах або картках, керуючись змістом попередньої лекції, поглиблення і розширення наявних знань, поповнення і виправлення записів, фіксування питань, що виникають, обмірковування плану відповіді на питання (добір відповідних фактів, цитат і аргументів), ознайомлення з рецензіями на літературу, яку вивчають, концентрація уваги на головному, консультування у викладача [43].

Для семінару характерний безпосередній зв'язок між педагогами і студентами, атмосфера взаєморозуміння. Особливістю семінару є те, що він проводиться за поданим планом [49].

Широкого поширення набули семінари дослідницького типу, які передбачають індивідуальну роботу студентів на заняттях, а саме: визначення конкретних цілей дослідження; поетапне засвоєння навчального матеріалу невеликими порціями, перехід від простого до складного; швидке й багаторазове відображення навчального матеріалу; самоконтроль студентів; засвоєння кожної попередньої одиниці навчального матеріалу як необхідна умова для переходу до наступної. При цьому обов'язковою умовою є контроль за самостійною індивідуальною роботою студента з боку викладача.

Досвід показав, що кожна з названих форм семінару має свої переваги і може застосовуватися у педагогічній діяльності в разі потреби. Так, розгорнута бесіда дає змогу залучити до дискусії максимальну кількість студентів. Реферативна форма семінарів дає можливість аналізувати питання на високому теоретичному рівні, оскільки при написанні рефератів студенти використовують не лише основну, а й додаткову літературу. Семінар, що проводиться у вигляді теоретичної конференції, нагадує реферативну форму навчання. Відмінність полягає в тому, що теоретичну конференцію готують більш ґрунтовно і в ній беруть участь не одна, а кілька студентських груп чи навіть цілий курс. З метою інтенсифікації навчального процесу в зарубіжній вищій школі широкого застосування набув принцип індивідуалізації, особливо у практиці навчання найздібніших студентів. Формуються спеціальні групи з особливо талановитих студентів, які займаються за індивідуальними програмами [51].

На сучасному етапі існує велика кількість різновидів семінарів, кожен з яких створює специфічні умови для прояву активності студента. У вищих навчальних закладах широкого поширення набувають спецсемінари – семінари дослідницького типу з незалежною від лекційного курсу тематикою, метою

яких є поглиблене вивчення окремих науково-практичних проблем, з якими зіткнеться майбутній фахівець [44].

У системі становлення педагогічної культури викладачів доцільно було б використовувати такий вид роботи: керівник науково-методичного семінару завчасно доручає одному з викладачів ґрунтовно опрацювати теоретичну проблему, провести низку відкритих занять зі студентами, зробити експериментальний зріз знань з метою з'ясування ефективності впливу специфічної навчальної діяльності на якість знань і розвиток, ставлення студентів до таких методів і технологій. Результати проведеної роботи потрібно обговорювати на семінарі. Такий підхід може носити своєрідний агітаційний характер, виступати стимулом для подальших пошуків [43].

Зміна освітньої парадигми вимагає докорінної зміни стосунків між викладачем та студентом. Створення сприятливого навчального середовища неможливе без «зворотного зв'язку», який дозволяє викладачу регулярно контролювати та корегувати процес отримання знань студентами. Цей зворотний зв'язок має бути системним, регулярним та логічно завершеним [53].

Професійний педагог Олександр Гін зазначав принцип зворотного зв'язку викладача є формулюванням: регулярно контролювати процес навчання за допомогою розвиненої систем і прийомів зворотного зв'язку. Чим більше розвинена система – технічна, економічна, соціальна чи педагогічна, – тим більше в ній механізмів зворотного зв'язку. Наприклад, фізик під час дослідження напівпровідникових приладів вимірювання вольт-амперної характеристики діода відстежує мультиметр, знати точність вимірювання і побудувати графік, в якому напруга відкладається вздовж осі абсцис, а струм – вздовж осі ординат виглядає так, що струм зростає при зростанні прикладеної напруги. Без цього успішний фізик немислимий. Успішне заняття теж. Тільки викладач на занятті відстежує інші параметри: психологічний клімат, ступінь їхньої зацікавленості, рівень розуміння. Викладач не має «термометра настрою» чи «висотоміра розуміння», зате в нього є свій набір прийомів, що дозволяють чітко зорієнтуватись в обставинах [41].



## 4.2. Методичне забезпечення навчання на семінарське заняття та підготовка до нього

Технології колективного способу навчання розкриє дії викладач міг розробити методичне навчання для студентів семінарського заняття за такою наступною схемою (рис. 4.1):



Рис. 4.1. Етапи заняття в технології колективного способу навчання

Схема вже описана, що все це залежить від організаторської роботи викладача по підготовці семінарського заняття та від ступеня підготовленості студентів, їхньої активності на самому занятті [40].

Підготовка семінару починається з вивчення викладачем вихідної документації, визначення (уточнення) цілей і завдань семінару, часу підготовки студентів. Тільки після цього можна приступати до розробки плану проведення семінарського заняття (рис. 4.2.). Обов'язкові компоненти плану:

Тема.

Мета заняття.

Організаційно-методичні вказівки.

Навчальні питання, що підлягають розгляду.

Теми доповідей, повідомлень, рефератів.

Рекомендована література.

Навчальні питання, які повинні обговорюватися на семінарі, становлять основу плану.

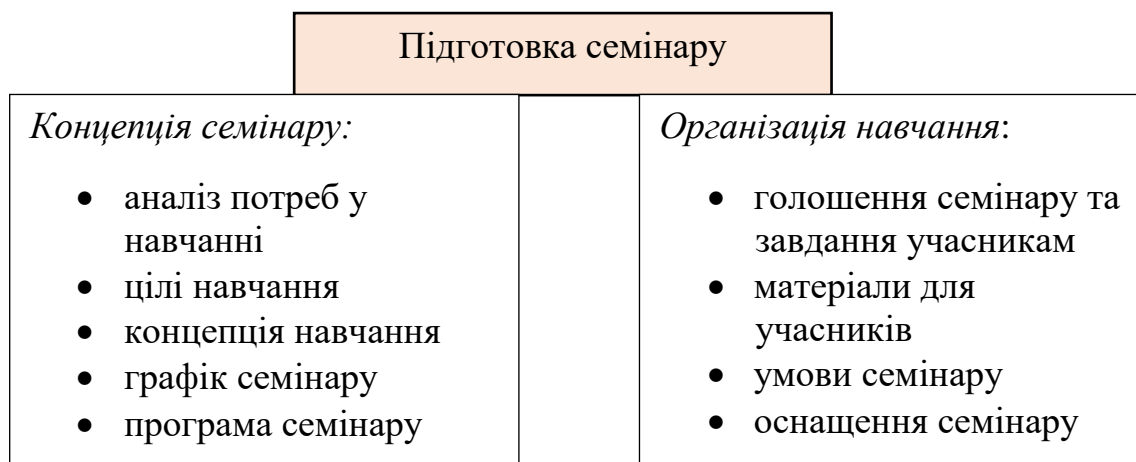


Рис 4.2. Концепція та організація семінару

Якщо семінар проводиться методом розгорнутої бесіди, питання його плану повинні відповідати наступним вимогам:

- бути проблемними за формою і водночас не занадто широкими, строго окресленими у своїх межах;

- не повторювати дослівно формулювання відповідних пунктів плану лекції й програми курсу;

- формулювання питань має спонукати студентів до роботи з джерелами. Аналогічні вимоги пред'являються до теми рефератів (доповідей, повідомлень), якщо вони передбачені планом семінару.

Для семінарів є характерним безпосередній контакт викладачів і студентів, тому дуже важливо встановити атмосферу довіри, взаєморозуміння, уміло втягувати студентів в дискусію.

Такі заняття ефективні в тому разі, коли вони готуються завчасно, хоча досвідчені викладачі можуть дозволити собі й експромт.

Дослідниця Ірина Луцик дала критеріями оцінки якості семінарського заняття вважають:

- цілеспрямованість (постановка проблеми, бажання пов'язати теорію з практикою);
- планування (виокремлення головних питань, пов'язаних з профілюючими дисциплінами, ознайомлення з останніми досягненнями науки і техніки);
- організацію роботи (вміння організувати і підтримати дискусію, конструктивний аналіз усіх відповідей і виступів студентів, поведінка викладача);
- стиль проведення заняття (пожвавлений, з постановкою гострих питань, або млявий);
- ставлення студентів до викладача (критичне, байдуже, шанобливе);
- управління групою (викладач швидко встановлює контакт з учасниками семінару, впевнено і вільно тримається, справедливо взаємодіє з ними);
- висновки викладача (кваліфіковані, переконливі з глибокими теоретичними узагальненнями) [46].

Суттєвий вплив на ефективність досягнення мети семінарського заняття має розташування учасників, яке зумовлює той або інший спосіб їх

спілкування. Традиційна група студентів розташовується один за одним, обличчям до викладача. В цьому випадку реалізується групова форма занять: одна людина – викладач – взаємодіє з групою як з цілим, виконує повчальну функцію по відношенню до всіх. При виступі на семінарі студент бере цю функцію на себе, проте груповий спосіб спілкування зберігається. Фактично на такому семінарі відтворюється класична форма лекційних занять, яка, відповідно, нагадує форму шкільного уроку, що виникла історично раніше. На такому семінарі не відбувається особистісної участі студентів, зменшується інтелектуальна ініціатива, вона належить переважно викладачеві. Існує велика психологічна дистанція між ним і студентами, ставляться бар'єри спілкування та взаємодії. Студенти мають можливість «сховатися» за інших, відсидітися, відмовчатися, займатися під час лекції або семінару іншою роботою. Такою формою організації заняття студент ставить в пасивну позицію, мовна активність зводиться до мінімуму, кожен висловлюється з особистого дозволу викладача. Основна маса студентів мовчки споживає інформацію і не має достатньої практики формулювання думки на професійній мові [40].

Розроблене семінарське заняття вказано наступного підрозділу 4.3 можна зробити висновок, що до методичного забезпечення студентів на семінарське заняття, які навчаються на фізико-математичному факультеті за спеціальністю «фізика», передбачені такі етапи засвоєння знань:

1) на початковому етапі в молодшому курсі в рамках «Електрика і магнетизм» тема про напівпровідники дає змогу поглибити знання та розширити інформацію, використовувати прилади в лабораторних роботах, навчитися працювати з науковою літературою і ретельно готувати реферати (виконання завдання залежить від викладача);

2) на середньому етапі вивчення оптики та атомної фізики – студенти ознайомлюються з поняттями «хвильова оптика», «хвильова функція», «квантування енергії»; основні теми «Хвильова оптика. Когерентні і некогерентні джерела. Інтерференція хвиль. Методи одержання інтерференційних картин. Дифракція світла та її застосування», «Квантові

явища в твердих тілах», «Спонтанне та вимушене випромінювання, лазер і тиск та їх застосування», «Теплоємність. Квантова теорія теплоємності. Фонони», «Елементи зонної теорії кристалів. Дозволені та заборонені енергетичні зони. Поділ кристалів на провідники, напівпровідники та діелектрики. Статистика вільних електронів у металах: рівень Фермі, температура Фермі, вироджений та невироджений електронний газ. Статистика електронів у напівпровідниках, *p-n* – перехід»;

3) на останньому етапі старшого курсу з дисципліни «Фізика твердого тіла (вибрані питання фізики)» студенти ознайомлюються з прикладами кристалічних структур, властивостями опису кристалічної структури; дефектами кристалічної решітки; методами опису кристалографічної структури, зі способами опису положень і орієнтації площин; дифракційними методами визначення структури кристалів та іншого, також поглиблюють вивчення електроніки (вони повинні знати основні поняття фізичної основи наноелектроніки, технологічні особливості формування наноструктур і елементів наноелектроніки).

Отже, вказаний вище текст відповідає навчальним програм, основними функціями яких є: джерела інформації, необхідні пояснення, які певним чином організують навчальний процес, регулюють темп вивчення навчального предмету, контролюють ступінь засвоєння інформації, забезпечують зворотній зв'язок. Загальне вивчення матеріалу, який вже пройшли з попередньої теми, старшокурсники готуються до семінарського заняття за допомогою методу мозкового штурму, який є узагальнюючим, наприклад, основне поняття електронно-дірковий перехід, що носило довідковий характер. Також можна звернути увагу на методи організації навчальної взаємодії, що все частіше застосовуються у вищих навчальних закладах:

1) метод проектів, що активно входить у навчальну практику, «проектний метод» («Project Work») [35], передбачає роботу студента над певним завданням, виконання якого потребує самостійної роботи з різноманітними інформативними джерелами, матеріалами архівів, бесіди з іншими фахівцями у

певній галузі тощо; цей метод використовується для формування із студентів самостійних дослідників, спроможних трансформувати себе, знайти необхідну інформацію і виробити власну робочу теорію;

2) завдання, наближені до реальної професійної комунікативної ситуації;

3) диспут передбачає спеціально підготовлену й організовану публічну суперечку на наукову або навчальну тему, в якій беруть участь дві або більше сторін, котрі обстоюють свої позиції, вони сприяють формуванню оцінних суджень і розвивають комунікативну культуру за умови створення доброзичливої психологічної атмосфери, взаємної поваги і зацікавленості;

4) модельний метод надає тим, хто навчається самостійності і можливості творчого пошуку як в індивідуальній, так і в самостійній діяльності при організаційній та експертній допомозі викладача;

5) метод розгорнутої бесіди, а саме заслуховування й обговорення доповідей або повідомлень, можливо, опанування та рецензування прослуханого тощо;

6) метод ситуацій сприяє формуванню у майбутнього фахівця вміння ставити завдання й виконувати його за певних обставин, тобто самостійно розібратися в реальній ситуації, встановити корпус необхідної для розв'язування певної проблеми інформації [44];

7) метод «питання-відповідь» є метою такого семінару є перевірити глибину знань студентів усього комплексу запитань, запропонованих на семінар. Викладач ставить запитання за темою, але сформульовані так, що на них не можна відповісти цитатою з підручника або конспекту. Інтенсифікацією мислення студентів на такому семінарі можуть стати провокаційні запитання, тобто такі, в яких прихована помилка, що побудовані за принципами формальної логіки чи ставлять під сумнів правильну відповідь або судження;

8) метод рефлексія. Під час проведення такого семінару обговорюються основні результати проведених занять, аналізуються способи освітньої діяльності та особливості отриманої продукції. Студенти коротко висловлюють свої думки щодо порушених питань. Викладач та лідери малих груп фіксують

узагальнені та систематизовані результати рефлексії. Потім відбувається колективне обговорення ключових проблем, виявлених під час індивідуальних виступів [40].

Оволодіння студентів програмованого змісту навчальної програми при семінарському занятті відповідно до індивідуальних особливостей (темپ навчання, рівень научуваності тощо). Виконання цієї вимоги дозволяє досягти загальнозрозумілості навчальної програми.

Крокова навчальна процедура – це технологічний прийом, який означає, що навчальний матеріал в програмі складається з окремих, самостійних але взаємопов'язаних, оптимальних за величиною порцій інформації і навчальних завдань (що відображають теорію засвоєння знань студентами і сприяють ефективному засвоєнню знань і умінь). Сукупність інформації для прямого та зворотного зв'язку і правил виконання пізнавальних дій утворює крок навчальної програми.

До складу кроку включаються три взаємопов'язані ланки (кадри): інформація, операція із зворотнім зв'язком і контроль [39]

Програмоване навчання на семінарське заняття виникає природна вимога вести направлений інформаційний процес і надавати кожному студенту можливість просуватися у навчанні зі швидкістю, яка для його пізнавальних сил найсприятливіша, а відповідно до цього можливість пристосовувати і подачу керуючої інформації.

Взаємодія «викладач-студент» на семінарському занятті є основною проблемою – недотримання педагогічних умов взаємодії викладача й студентів, що пов'язано з існуючим протиріччям між орієнтованістю викладача на реалізацію суб'єкт-суб'єктних відносин у педагогічній взаємодії та стереотипами традиційного навчання, що все ще зберігаються [48].

Структура процесу засвоєння знань передбачає згідно з тезою С.Л. Рубінштейна: « ... первісне ознайомлення з матеріалом або його сприйняття у широкому розумінні слова, осмислення, спеціальну роботу із закріпленням й,

насамкінець, оволодіння матеріалом, тобто можливість оперувати ним у різних умовах, застосовувати його на практиці» [52].

До психологічних компонентів засвоєння змісту навчального матеріалу, на думку С. Рубінштейна, М. Левітова, належать:

- позитивне ставлення до студентів;
- безпосереднє чуттєве ознайомлення з матеріалом;
- мислення як процес активного опрацювання отриманого матеріалу;
- запам'ятовування і збереження отриманої та опрацьованої інформації [50].

Таким чином студенти фізико-математичного факультету групи фізиків, складаючи навчальний зміст для засвоєння вивченого матеріалу, змогли готуватися до семінарського заняття як до виду самостійної роботи, а викладач розробляє методи і технології навчання на рівні міні-модуля – інваріантну систему проблемно-діагностичних методів, що, залежно від етапу організації модульно-розвивального процесу, що утворюється з групи колективної проблемно-діалогічної діяльності студентів (навчальний диспут, дискусія) і спільної проблемно-діагностичної діяльності викладача й студентів (евристична бесіда, продуктивний діалог, сценарій та ін.).

Підготовка викладача до семінарського заняття є організацією праці педагога. Студенти взаємодіють з викладачем – це зворотній зв'язок, який залежить від культури педагога, рівня розробки методичного забезпечення, вираховування індивідуальних та інтелектуальних здібностей (психологічні потреби), освітньо-виховного значення вивчення педагогічних дисциплін, організації навчально-виховного процесу, вирішення типових проблем споріднених навчальних закладів за допомогою варіювання підготовлених матеріалів.

Переваги семінарського заняття:

- забезпечення зворотного зв'язку між викладачем та студентами;
- ступінь розуміння викладення змісту навчального матеріалу;
- активізація пізнавального процесу у студентів під час заняття;



- вміння знайти вихід із ситуації;
- переключення уваги на сприймання інформації і знаходження відповіді на запитання.

Недоліки семінарського заняття:

- невдале обґрунтування питання пошук відповіді;
- не вміння знайти нестандартне вирішення ситуацій;
- відсутня організаційна мотивація навчання студентів.

Методичні рекомендації вивчення навчального процесу семінарського заняття:

- доцільно і методично грамотно використовувати наукову літературу, що в подальшому активізує діяльність студентів і тим самим покращить результати навчання;

- питання, що виносяться на семінарське заняття, можна, в першу чергу, використовувати для самостійної роботи студентів, поглиблення знань, перевірки гіпотез, дослідження та виявлення фізичних властивостей;

- вміло поєднувати традиційні та інноваційні методи навчання фізики, здійснюючи новий сучасний підхід до навчання студентів.

Можна виокремити такі умови організації навчального процесу семінарського заняття:

1. Подання навчального матеріалу має бути лаконічним, логічним, доступним і науковим.
2. Використовувати мультимедійну презентацію, для більшої наочності, або ж щоб прискорить темп заняття.
3. Забезпечити усі необхідні умови роботи студентів на занятті.

Організаційно-вступна частина семінарського заняття з використанням технічних засобів навчання є мультимедійною презентацією, що дозволяє активізувати увагу студентів на актуальності питань, які розглядаються для поглибленого вивчення теми.

Для роботи на семінарському занятті достатньо використовувати смартфон, але для підготовки до лекційного заняття, для попередньої роботи з

матеріалами, їх вдалим застосуванням під час проведення заняття потрібно забезпечити викладача комп'ютером (ноутбуком, нетбуком, планшетом).

Після закінчення семінарського заняття викладач оцінюється знань студентів та їх критерій.

Висновок здійснюється, що методичне забезпечення викладача на семінарське заняття у вищих навчальних закладах кожен педагог контролює і є центром навчального процесу та відповідного змісту програми. Студент відіграє пасивну роль – це все вимагає від викладача різноманітних підходів у навчанні та навчально-виховних завдань.

### **4.3. Розробка семінарського заняття на тему «Латеральні двовимірні структури з діодними властивостями»**

До роботи додається матеріал із семінарського заняття, який відображає дану тему.

**Тема:** Латеральні двовимірні структури з діодними властивостями

**Мета:**

*освітня:* отримати знання про графен, латеральні двовимірні структури з діодними властивостями та на атомарному рівні; навчитися аналізувати електронні характеристики латеральних двовимірних структур на основі графену;

*виховна:* розвивати логічне мислення, вміння аналізувати, робити логічні висновки;

*розвиваюча:* зацікавити студентів предметом.

**Вид заняття:** семінар

**Тип:** семінар з використанням евристичної бесіди

**Наочність:** мультимедійний комплекс

**Міжпредметні зв'язки:** хімія

**Структура заняття:**

I. Організаційний момент

II. Вступ

III. Обговорення питань, винесених на семінар

IV. Підведення підсумків семінару

**Хід заняття**

**I. Організаційний момент**

**II. Вступ**

*Мотивація пізнавальної діяльності студентів:*

Основною метою цього семінарського заняття є основні знання з фізики твердого тіла, які можуть вас зацікавити та дати насагу вивчати цей предмет надалі.

***Повідомлення теми семінару:***

***План***

1. Тривимірні  $p-n$  – переходи
2. Створення латерального  $p-n$  – переходу у чорному фосфорені
3. Латеральні двовимірні структури з діодними властивостями на основі графену

**III. Обговорення питань, винесених на семінар.**

**1. Тривимірні  $p-n$  – переходи**

- a) Що Вам відомо про електронно-дірковий перехід?
- b) Назвіть ряди методів створення  $p-n$  – переходів та його умови.
- c) Характер різкого переходу.
- d) Аналіз концентрації носіїв.
- e) Енергетична діаграма  $p-n$  – переходу.
- f) На що впливає фактор  $p-n$  – переходу?
- g) Як змінюється характер потенціалу в  $p-n$  – переході?
- h) Характер плавного переходу.
- i) Чи є рівняння Пуассона для плавного переходу?

**2. Створення латерального  $p-n$  – переходу у чорному фосфорені**

- a) Якими є двовимірні матеріали і для чого вони використовуються?
- b) Щільний контакт двох матеріалів у гетероструктурі для 3D-переходів.
- c) Що утворює обмін зарядами у двовимірному бічному переході?
- d) Дайте визначення поняттю «легування».
- e) Чим є процес легування  $n$ -типу і подайте зображення енергетичної структури кількешарового ЧФ та БВ.
- f) Чи синтезувався відновлений ВБ? Якщо так, то як він виділявся?
- g) Як створювався польовий транзистор з чорного фосфорену?
- h) Як отримати латеральний  $p-n$  – перехід в каналі?

i) Як показали атомно-силовий мікроскоп і рентгенівську фотоемісійну спектроскопію?

j) Спектр Рамана ділянки каналу подвійного польового транзистора та його залежність  $I$  від  $V$  кількешарового ЧФ.

k) Молекули легуючих речовин (молекула БВ може десорбувати зануренням у розчин толуолу).

l) Чи може площинний  $p$ - $n$  діод з ЧФ використовуватися як фотоелектричний сонячний елемент?

### **3. Латеральні двовимірні структури з діодними властивостями на основі графену**

#### ***3.1. Методи функціоналу електронної густини та псевдопотенціалу із перших принципів для обчислення електронних характеристик латеральних двовимірних структур***

a) Яким є рівняння Кона-Шема?

b) Яка формула потенціальної енергії в наближенні Борна-Оппенгеймера визначається мінімальним енергетичним функціоналом по відношенню до хвильових функцій?

c) Яка формула є додатковою умовою ортонормування, що приводить до одночастинкових рівнянь Кона-Шема, які розглянуті в попередньому запитанні?

d) Як розраховується за формулою кулонівський потенціал в обраному напрямку?

e) Яким є результат розрахунків електронної структури багатоатомної системи в межах теорії функціонала електронної густини?

#### ***3.2. Модельні об'єкти та результати обчислень електронних характеристик латеральних двовимірних структур на основі графену***

a) Чим відрізняється хімічна адсорбція від фізичної?

b) Що належить до функціоналізованих графенових структур?

c) Дайте коротку характеристику графану.

d) Охарактеризувати флюорографен і хлорографен.

- e) Як зміниться гібридизації від  $sp^2$  до  $sp^3$  при функціоналізації графену?
- f) Побудова суперрешітки з примітивною коміркою тетрагонального типу.
- g) Якими є результати розподілу планарного заряду бічних латеральних переходів графен/графан, графен/флюорографен, графен/хлорографен?
- h) Що призводить до формування потенціальних бар'єрів?
- i) Подайте зображення та опишіть енергетичні зонні діаграми бічних латеральних переходів.

*Студенти відповідають на запитання, які розглянуто в першому, другому, третьому розділі в змісті.*

#### **IV. Підведення підсумків семінару**

- Чорний фосфорен (ЧФ) – природний двовимірний матеріал, є привабливим для використання в електроніці та фотоніці завдяки унікальній площинній анізотропії, залежній від товщини матеріалу, прямої забороненої енергетичної зони та високій рухливості носіїв. Він добре підходить для оптоелектроніки ближньої та середньої інфрачервоної області поляризованого спектра, завдяки відносно вузькій забороненій зоні та асиметричній структурі.
- Латеральна конфігурація з'єднання складових 2D гетероструктур призводить до перерозподілу носіїв через їх бічну границю поділу без перенесення заряду між утвореними адсорбатами ділянками. При цьому, такі 2D латеральні гетеропереходи характеризуються перерозподіленими областями заряду різного знаку, які аналогічні областям виснаження домішок об'ємних p-n переходів.
- Области з різними знаками створюють умови для появи скачків потенціалів, що є основною характеристикою p-n переходу.
- Отже, створюючи на площині графену шляхом певних технологічних прийомів окремі ділянки локальної адсорбції різних хімічних елементів, можна організувати вбудовані p-n переходи.

*Оцінювання знання студентів.*

## Висновки до розділу 4

Семинар – традиційна форма організації навчального процесу, в якому викладач взаємодіє із студентами, надає додаткову інформацію з питання, що розглядається, виявляє нові судження та умовиводи, накреслює шляхи вирішення проблеми на основі висловлених думок на мові конкретної науки та формулювання висновків, застосовується вміння аналізувати інформацію та її порівняння, вести дискусію в якості діалогу.

Для семінарів є характерним безпосередній контакт викладачів і студентів, тому дуже важливо встановити атмосферу довіри, взаєморозуміння, уміло втягувати студентів в дискусію.

Взаємодія «викладач-студент» на семінарському занятті є основною проблемою – недотримання педагогічних умов взаємодії викладача й студентів, що пов'язано з існуючим протиріччям між орієнтованістю викладача на реалізацію суб'єкт-суб'єктних відносин у педагогічній взаємодії та стереотипами традиційного навчання, що все ще зберігаються.

## ВИСНОВКИ

Проаналізовано контакт двох напівпровідників одного виду з різним типом провідності приводить, що приводить до виникнення електронно-діркового або *p-n* – переходу.

Обговорена стратегія створення вбудованого *p-n* переходу у чорному фосфорені. Використовуючи бензил-віологен, як ефективну електронну легуючу домішку частини поверхні кількешарового чорного фосфорену, можна отримати вбудований площинний *p-n* перехід. Хімічне легування молекулами бензил-віологену модулює електронну густину і дозволяє набути великого вбудованого потенціалу в такому площинному *p-n* переході на основі чорного фосфорену, що має вирішальне значення для досягнення високої чутливості фотоприймачів, та високої квантової ефективності сонячних елементів.

На атомарному рівні теоретично досліджені моделі бічних латеральних переходів на основі графену з різними областями функціоналізації: графен/графан (C/CH), графен/флюорографен (C/CF), графен/хлорографен (C/CCl).

Методами функціоналу електронної густини та псевдопотенціалу із перших принципів на авторському програмному кодї кафедри фізики та методики її навчання були отримані просторові розподіли густини валентних електронів, густини електронних станів, ширини забороненої зони, кулонівські потенціали вздовж обраних напрямків досліджуваних структур, заряди на атомних остовах, побудовані енергетичні зонні діаграми бічних латеральних переходів на основі графена.

Латеральна конфігурація з'єднання складових 2D гетероструктур призводить до перерозподілу носіїв через їх бічну границю поділу без перенесення заряду між утвореними адсорбатами ділянками. При цьому, такі 2D латеральні гетеропереходи характеризуються перерозподіленими областями заряду різного знаку, які аналогічні областям виснаження домішок об'ємних *p-n* – переходів.

Області з різними знаками створюють умови для появи скачків



потенціалів, що є основною характеристикою  $p-n$  – переходу.

Отже, створюючи на площині графену шляхом певних технологічних прийомів окремі ділянки локальної адсорбції різних хімічних елементів, можна організувати вбудовані  $p-n$  – переходи.

Розроблено семінарське заняття на тему «Латеральні двовимірні структури з діодними властивостями».

Результати роботи можуть бути використані науковцями, які займаються дослідженням властивостей матеріалів та нанотехнологами, які працюють над розробкою пристроїв, в основі яких лежать зазначені структури.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Li M. Y. et al. Heterostructures based on two-dimensional layered materials and their potential applications. // *Mater. Today*. – 19. – 2016. – P. 323–335;
2. Li X. et al. Graphene and related two-dimensional materials: Structure-property relationships for electronics and optoelectronics // *Applied Physics Reviews*. – 2017. – 4.
3. S.M. Hus, A.-P. Li, Spatially-resolved studies on the role of defects and boundaries in electronic behavior of 2D materials // *Prog. Surf. Sci.* – 2017. – P. 176-201;
4. Yu H., Katana A., and Yakobson B.I. Carrier Delocalization in Two-Dimensional Coplanar p-n Junctions of Graphene and Metal Dichalcogenides // *Nano Lett.* – 2016. – 16(8). – P. 5032-5036;
5. Zhou X. et. al. Booming Development of Group IV–VI Semiconductors: Fresh Blood of 2D Family // *Adv. Sci.* – 2016. – 3;
6. M. Li, Y. Shi, C. Cheng, L. Lu, Y. Lin, H. Tang, M. Tsai, C. Chu, K. Wei, and J. He Epitaxial growth of a monolayer WSe<sub>2</sub>-MoS<sub>2</sub> lateral p-n junction with an atomically sharp interface // *Science*. – 2015. – 349(6247). – P. 524-528;
7. K. Chen, X. Wan, W. Xie, J. Wen, Z. Kang, X. Zeng, H. Chen, and J. Xu Electronic Properties of MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> Heterostructures Synthesized with Two-Step Lateral Epitaxial Strategy // *Adv. Mater.* – 2015. – 27(6431);
8. V. Tran, R. Soklaski, Y. Liang, and L. Yang Layer-controlled band gap and anisotropic excitons in few-layer black phosphorus // *Phys. Rev. B*. – 2014. – 89(23). – P. 235-319;
9. J. S. Ross, P. Klement, A. M. Jones, N. J. Ghimire, J. Yan, D. G. Mandrus, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. Kitamura, W. Yao, D. H. Cobden, X. Xu, Electrically tunable excitonic light-emitting diodes based on monolayer WSe<sub>2</sub> p–n junctions // *Nat. Nanotechnol.* – 2014. – 9. – P. 268–272;
10. J. Qiao, X. Kong, Z.-X. Hu, F. Yang, W. Ji, High-mobility transport

- anisotropy and linear dichroism in few-layer black phosphorus // *Nat. Commun.* – 2014. – 5. – P. 4475;
11. F. Xia, H. Wang, D. Xiao, M. Dubey, A. Ramasubramaniam, Two-dimensional material nanophotonics // *Nat. Photonics.* – 2014. – 8. – P. 899–907;
  12. L. Li, G. Ye, V. Tran, R. Fei, G. Chen, H. Wang, J. Wang, K. Watanabe, T. Taniguchi, L. Yang, X. Chen, and Y. Zhang, Quantum Oscillations in A Two-Dimensional Electron Gas in Black Phosphorus Thin Film // *Nat. Nanotechnol.* – 2015. – 10(7). – P. 608-613 ;
  13. D. He, Y. Zhang, Q. Wu, R. Xu, H. Nan, J. Liu, J. Yao, Y. Li, Y. Shi, J. Wang, L. He, Z. Ni, F. Miao, F. Song, H. Xu, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Xu, and X. Wang, Two-dimensional monolayer quasi-freestanding molecular crystals for high-performance organic field-effect transistors // *Nat. Commun.* – 2014. – 5. – P. 5162;
  14. Kiriya D., Tosun M., Zhao P., Kang J.S., and Javey A. Air-stable surface charge transfer doping of MoS<sub>2</sub> by benzyl viologen // *J. Am. Chem. Soc.* – 2014. – 136. – P. 7853–7856;
  15. Y. Liu, F. Xu, Z. Zhang, E.S. Penev, B.I. Yakobson, Two-dimensional mono-elemental semiconductor with electronically inactive defects: The case of phosphorus // *Nano Lett.* – 2014. – 14(12). – P. 6782–6786;
  16. S.M. Kim, J.H. Jang, K.K. Kim, H.K. Park, J.J. Bae, W.J. Yu, I.H. Lee, G. Kim, D. D. Loc, U.J. Kim, E.-H. Lee, H.-J. Shin, J.-Y. Choi, Y.H. Lee, J., Reduction-Controlled Viologen in Bisolvent as an Environmentally Stable n-Type Dopant for Carbon Nanotubes // *Am. Chem. Soc.* – 2009. – 131. – P. 327–331;
  17. Xuechao Yu, Shengli Zhang, Haibo Zeng, Qi Jie Wang. Lateral black phosphorene p–n junctions formed via chemical doping for high performance near-infrared photodetector // *Nano Energy.* – 2016. – 25. – P. 34–41;
  18. C.-G. Andres, V. Leonardo, P. Elsa, O.I. Joshua, K.L. Narasimha-Acharya,

- I. B. Sofya, J.G. Dirk, B. Michele, A.S. Gary, J.V. Alvarez, W.Z. Henny, J.J. Palacios, S. J.V.D.Z. Herre, Isolation and characterization of few-layer black phosphorus // *2D Mater.* – 2014. – 1(2);
19. S. Sugai, I. Shirotni, Raman and infrared reflection spectroscopy in black phosphorus // *Solid State Commun.* – 1985. – 53(9). – P. 753–755;
  20. S. Zhang, J. Yang, R. Xu, F. Wang, W. Li, M. Ghufuran, Y.-W. Zhang, Z. Yu, G. Zhang, Q. Qin, Y. Lu, Extraordinary photoluminescence and strong temperature/angle-dependent Raman responses in few-layer phosphorene // *ACS Nano.* – 2014. – 8. – P. 9590–9596.
  21. T. Takahashi, K. Shirotni, S. Suzuki, T. Sagawa, Band structure of black phosphorus studied by angle-resolved ultraviolet photoemission spectroscopy // *Solid State Commun.* – 1983. – 45. – P. 945–948.
  22. H. Liu, A.T. Neal, Z. Zhu, Z. Luo, X. Xu, D. Tománek, P.D. Ye, Phosphorene: An unexplored 2D semiconductor with a high hole mobility // *ACS Nano.* – 2014. – 8. – P. 4033–4041;
  23. L. Li, Y. Yu, G.J. Ye, Q. Ge, X. Ou, H. Wu, D. Feng, X.H. Chen, Y. Zhang, Black phosphorus field-effect transistors // *Nanotechnol.* – 2014. – 9. – P. 372–377;
  24. Das, M. Demarteau, A.K. Roelofs, A. Ambipolar phosphorene field effect transistor // *ACS Nano.* – 2014. – 8. – P. 11730–11738;
  25. D. Xiang, C. Han, J. Wu, S. Zhong, Y. Liu, J. Lin, X.-A. Zhang, W. Ping Hu, B. Özyilmaz, A.H.C. Neto, A.T.S. Wee, W. Chen, Surface Transfer Doping Induced Effective Modulation on Ambipolar Characteristics of Few-Layer Black Phosphorus // *Nat. Commun.* – 2015. – 6. – P. 6485;
  26. M. Buscema, D.J. Groenendijk, G.A. Steele, H.S.J. van der Zant, A. CastellanosGomez, Photovoltaic effect in few-layer black phosphorus PN junctions defined by local electrostatic gating // *Nat. Commun.* – 2014. – 5. – P. 4651.
  27. D.J. Groenendijk, M. Buscema, G.A. Steele, S. Michaelis de Vasconcellos, R. Bratschitsch, H.S.J. van der Zant, A. Castellanos-Gomez, Photovoltaic and

- photothermoelectric effect in a double-gated WSe<sub>2</sub> device // Nano Lett. – 2014. – 14. – P. 5846–5852.
28. Sahin H., Leenaerts O., Singh S. K., and Peeters F. M. GraphAne, From Synthesis to Applications // WIREs Comput. Mol. Sci. – 2015. – 5. – P. 255–272;
  29. Chao Zhou, Sihao Chen, Jianzhong Lou, Jihu Wang, Qiujie Yang, Chuanrong Liu, Dapeng Huang and Tonghe Zhu, Zhou et al. Graphene's cousin: the present and future of graphane // Nanoscale Research Letters. – 2014. – 9(26). – P. 1-9;
  30. Hernandez Rosas J. J. et al. First principles calculations of the electronic and chemical properties of graphene, graphane, and graphene oxide // J Mol Model. – 2011. – 17(5). – P. 1133–1139;
  31. Karlicky F., and Otyepka M. Band Gap and Optical Spectra of Chlorographene, Fluorographene and Graphane from G<sub>0</sub>W<sub>0</sub>, GW<sub>0</sub> and GW Calculation on Top of PBE and HSE06 Orbitals // J. Chem. Theory Comput. – 2013. – 9. – P. 4155–4164;
  32. Sahin H., Topsakal M., and Ciraci S. Structures of fluorinated graphene and their signatures // Phys. Rev. – 2011. – B(83);
  33. Sahin H., Ciraci S. Chlorine Adsorption on Graphene: Chlorographene // J. Phys. Chem. – 2012. – 116(45). – P. 24075-24083;
  34. Bo Li, Lin Zhou, Di Wu, Hailin Peng, Kai Yan, Yu Zhou, and Zhongfan Liu Articles, Photochemical Chlorination of Graphene // ACS NANO. – 2011. – 5(7). – P. 5957-5961;
  35. Project Work, Ministry of Education, Singapore: Programmes [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [www.moe.gov.sg/education/programmes/project-work](http://www.moe.gov.sg/education/programmes/project-work)
  36. Balabai R.M., Lubenetsz A.G. Lateral Junctions Based on Graphene with different doping regions // XVI Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок та наносистем (присвячена пам'яті професора Дмитра Фреїка). Матеріали. / За заг. ред. проф. Прокопів В.В. – Івано-

- Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника. – 2017. – С.325.
37. Balabai R. Solomenko A. Flexible 2D layered material junctions // A. Appl Nanosci (2018) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0709-9>
38. Ab initio calculation [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://sites.google.com/a/kdpu.edu.ua/calculationphysics>
39. Балабай Р.М., Соломенко А.Г. Латеральні двовимірні структури з діодними властивостями // Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2017). Тези доповідей на II Всеукраїнській науково-практичній конференції: 22-24 листопада 2017 р., м. Дніпро / Укладачі Іванченко О.В., Вашерук О.В.– Дніпро, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Кременчук: ПП Щербатих О.В. – 2017. – 272-273 с.
40. Балабай Р. М., Лубенець А. Г. Бічні планарні переходи на листі графену з різними областями функціоналізації // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2017. – Vol.9. – №.5 – P. 05017-1 - 05017-8.
41. Гін О.А. Прийоми педагогічної техніки: Свобода вибору. Діяльність. Зворотний зв'язок. Ідеальність: посібник для вчителя / А.О. Гін. – 13-е видання. – Х. : Вид. група «Основа». – 2015. – 112 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://osnova.com.ua/preview/book/5300/%D0%9D%D0%A4%D0%9C001%20%D0%9A%D0%BE%D0%B4%20%D0%9D%D0%A4%D0%9C001.pdf>
42. Егоров, Н.М. Электроника. Версия 1.0 [Электронный ресурс]. – конспект лекций / Н.М. Егоров. – Электрон. дан. (3 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ. – 2008. – (Электроника : УМКД №48-2007 / рук. творч. коллектива Н.М. Егоров)
43. Енциклопедія педагогічних технологій та інновацій / Автор-укладач Н. П. Наволокова. – 2-ге вид. – Х. : Вид. група «Основа». – 2012. – 176 с. – (Серія «Золота педагогічна скарбниця»)

44. Жижко Т.А. Педагогічна система один із чинників впровадження ідеї інтенсифікації у професійній підготовці майбутніх фахівців – [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://enpuir.npu.edu.ua/bitstream/123456789/3925/1/Zhyzhko.pdf>
45. Кабакова Л., Мирончк Н.М. Організаційні форми роботи у вищому навчальному закладі // Модернізація вищої освіти в Україні та за кордоном : збірник наукових праць / за заг. ред. д.п.н., проф. С. С. Вітвицької, к.п.н., доц. Н. М. Мирончук. – Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка. – 2014. – 150-154 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://eprints.zu.edu.ua/13847/1/19.pdf>
46. Луцик І. Інтерактивні семінари як форма активізації навчально-пізнавальної діяльності студентів вищих закладів освіти [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbu.gov/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/NZTNPU\\_ped\\_2009\\_3\\_31.pdf](http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu.gov/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/NZTNPU_ped_2009_3_31.pdf)
47. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники : Учебник для вузов / Вадим Дмитриевич Соболев. – М. : Высш. Школа. – 1979. – 448с.
48. О. В. Гончар Семінар як форма організації педагогічної взаємодії учасників навчального процесу вищої школи України (друга половина ХХ ст.). [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sportpedagogy.org.ua/html/journal/2010-05/10govxxc.pdf>
49. Основні форми організації навчання [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://ru.osvita.ua/vnz/reports/pedagog/14274/>
50. Педагогика / Под. ред. Ю. К. Бабанского. – М. : Просвещени. – 1983. – 59 с.
51. Приходько Д.П., Зоркін Ю.Р. Сучасний зарубіжний досвід активізації навчального процесу у вищій школі // Сучасна війна: гуманітарний аспект. Науково-практична конференція ХНУ ПС ім. І.Кожедуба, 30 червня 2017 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

<http://www.hups.mil.gov.ua/assets/doc/science/stud-conf/suchasna-viynagumanitarniy-aspekt/40.pdf>

52. Рубинштейн С.Л. Основы общей психологии: в 2-х т. [Т.2.] / С.Л. Рубинштейн. – Москва. – 1989. – 84-85 с.
53. Роль зворотного зв'язку в навчальному процесі: досвід застосування методів “три конверти” та анкетування [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:  
[http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:XLNkEy-3vysJ:www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbu/cgiirbis\\_64.exe%3FC21COM%3D2%26I21DBN%3DUJRN%26P21DBN%3DUJRN%26IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD%3D1%26Image\\_file\\_name%3DPDF/Mir\\_2010\\_7-8\\_21.pdf+%&cd=1&hl=ru&ct=clnk&gl=ua](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:XLNkEy-3vysJ:www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe%3FC21COM%3D2%26I21DBN%3DUJRN%26P21DBN%3DUJRN%26IMAGE_FILE_DOWNLOAD%3D1%26Image_file_name%3DPDF/Mir_2010_7-8_21.pdf+%&cd=1&hl=ru&ct=clnk&gl=ua)