



ОЛІХ О. Я.

Акусто- та радіаційноіндуковані явища в поверхнево-бар'єрних кремнієвих та арсенід галієвих структурах

Актуальність

- Матеріал – основа мікроелектроніки та сонячної енергетики
- Спрямованість на розуміння процесів у напівпровідниках при поширенні ультразвукових хвиль та радіаційностимульованих ефектів
- Розробка нових методів керування властивостями бар'єрних структур
- З'ясування особливостей акусто-дефектної взаємодії при допороговій інтенсивності ультразвуку в малодислокаційних матеріалах



2

Мета

- встановлення фізичних закономірностей акустоіндукованих динамічних ефектів у кремнієвих структурах з p-n переходом та контактом Шотткі
- визначення фізичних причин впливу радіаційного опромінення та ультразвукового навантаження на проходження струму в напівпровідникових поверхнево-бар'єрних структурах
- розробка нових способів модифікації дефектної підсистеми кристалів з використанням ультразвуку

3

Наукова новизна

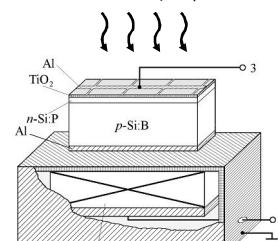
- Виявлено обратні ефекти впливу ультразвукового навантаження на електрофізичні властивості кремнієвих структур з p-n переходом і контактам метал-напівпровідник та встановлено їх характеристики
- Встановлено відмінність впливу акустичного навантаження на параметри вихідних та опромінених кремнієвих поверхнево-бар'єрних структур; визначено основні акустоактивні радіаційні дефекти
- Запропонована фізична модель акусто-активного комплексного дефекту
- Проведено порівняльний аналіз аналітичних, чисельних та еволюційних методів розрахунку параметрів діодів Шотткі з вольт-амперних характеристик та визначено найбільш оптимальні з точки зору точності та швидкодії
- Використовуючи модель поглинання ультразвуку Брейсфорда, встановлено механізми акустоіндукованих ефектів в кремнієвих структурах метал-напівпровідник.
- Виявлено взаємозв'язок характеру немонотонності дозової залежності зміни висоти бар'єру Шотткі при у-опроміненні зі ступенем неоднорідності контакту.
- Встановлено механізм впливу мікрохвильового випромінювання на параметри дефектів, розташованих у приповерхневих шарах кристалів GaAs, 6H-SiC та на внутрішніх границях арсенід галієвих епітаксійних структур.

4

Динамічні акустоіндуковані ефекти в радіаційно опромінених та неопромінених кремнієвих структурах з p-n переходом

5

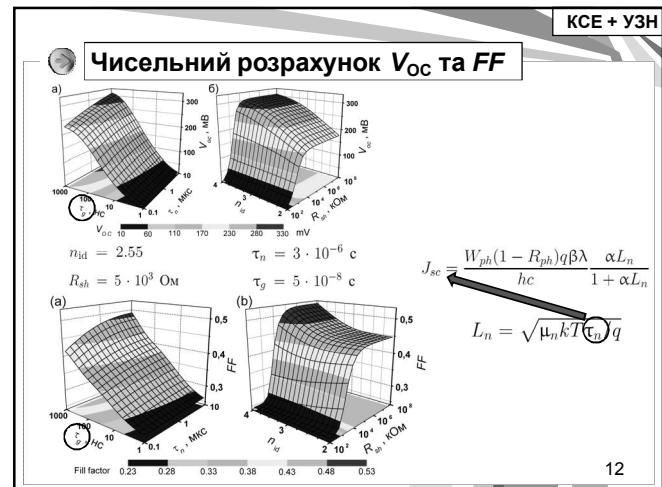
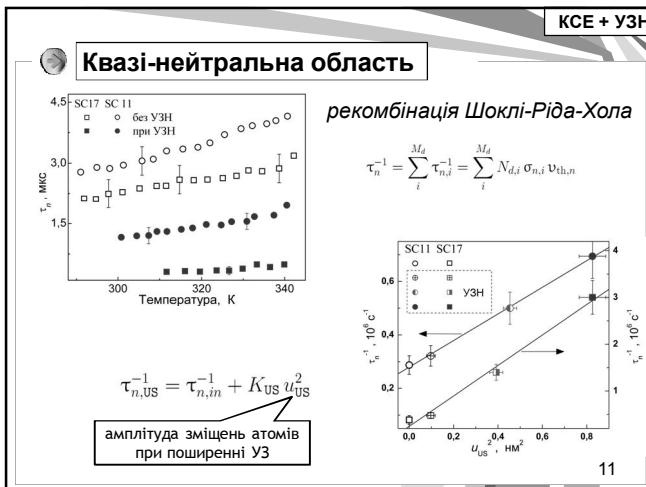
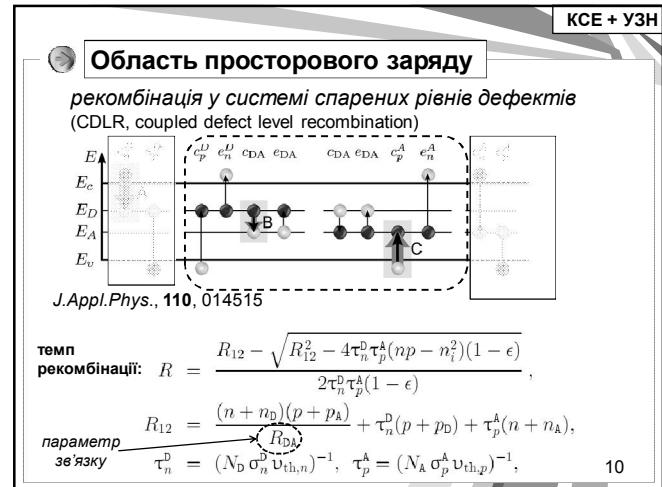
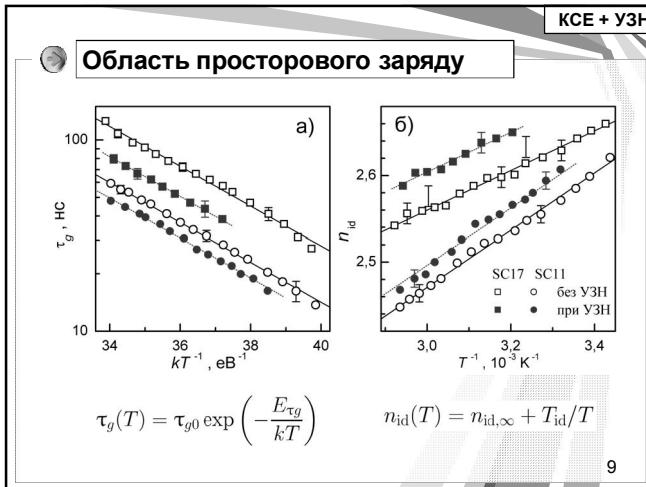
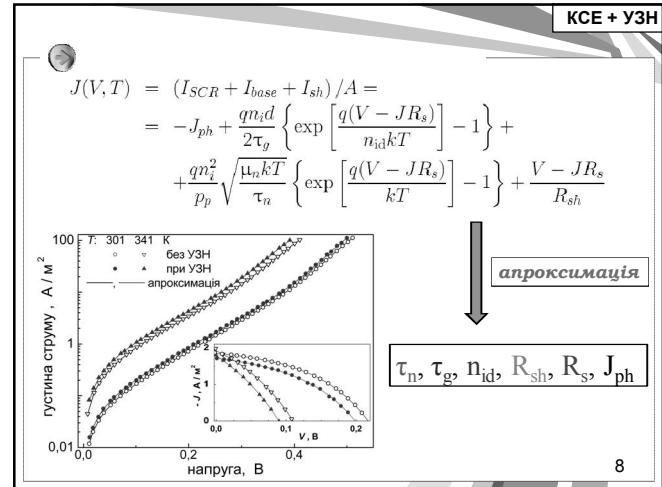
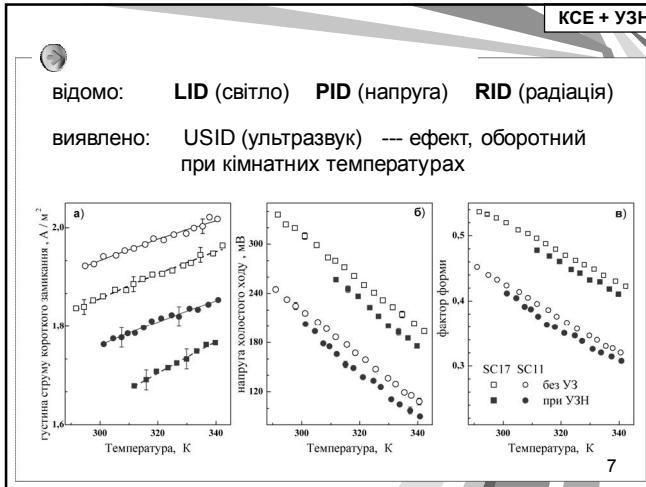
$$\lambda = 900 \text{ нм}, W_{ph} = 8 \text{ Вт}/\text{м}^2$$



- УЗН:
Хвилі: повздовжні,
поперечні
 $f_{us} = 4 - 26 \text{ МГц}$
 $W_{us} < 0.5 \text{ Вт}/\text{см}^2$

$$T = 290 - 330 \text{ K}$$

6



КСЕ + УЗН

Модель акустоактивного комплексного дефекту

сила на точковий дефект під час УЗН

$$F_d = \chi \Delta \Omega_d \frac{\partial \xi(z,t)}{\partial z}$$

χ – об'ємний модуль пружності
 $\Delta \Omega_d$ – зміна об'єму кристалу на один дефект

$$\partial \xi(z,t) / \partial z \sim \xi_{\text{US}} \sim u_{\text{US}} \sim \sqrt{W_{\text{US}}}$$

$$r_{\text{US}}(t) = \{[r_{in} + u_A \cos(\omega_{\text{US}} t + \delta) - u_D \cos(\omega_{\text{US}} t)]^2 \cos^2 \varphi + [u_A \cos(\omega_{\text{US}} t + \delta) - u_D \cos(\omega_{\text{US}} t)]^2 \sin^2 \varphi\}^{0.5}$$

13

КСЕ + УЗН

Модель акустоактивного комплексного дефекту

$$\sigma_{n,p}^{\text{DA}}(r) = C_{n,p}^{\text{DA}} r^2$$

$$R_{\text{DA}}(r) \sim N_D N_A \left[1 + \frac{r}{a_B} + \frac{1}{3} \left(\frac{r}{a_B} \right)^2 \right] e^{-r/a_B}$$

$$\varepsilon_\sigma = \frac{(u_D \pm u_A)^2}{2 r_{in}^2} = K_{\text{US}}^{\text{DA}} u_{\text{US}}^2$$

“+” при $(\Delta \Omega_d^D \cdot \Delta \Omega_d^A) < 0$
 “-” при $(\Delta \Omega_d^D \cdot \Delta \Omega_d^A) > 0$

$K_{\text{US}}^{\text{DA}}$ – характеризує взаємодію УЗН з комплексним дефектом

$$\tau_{n,\text{US}}^{-1} = \tau_{n,in}^{-1} + u_{\text{US}}^2 \sum_j^{M_{\text{DA}}} N_{d,j} \sigma_{n,j}^{\text{in}} K_{\text{US},j} v_{\text{th},n}$$

$\varphi = 0^\circ, \delta = 0^\circ$ (a) та $\varphi = 90^\circ, \delta = 180^\circ$ (б)

a) б)

14

КСЕ + УЗН

Визначення дефектного складу

основні рекомбінаційні центри в Cz-Si:B

- ВО-дефекти
- пари Fe_iB_s
- кисневмісні преципітати

чутливі до інтенсивного освітлення

15

КСЕ + УЗН

Визначення дефектного складу

основні рекомбінаційні центри в Cz-Si:B

– ВО-дефекти –

16

КСЕ + УЗН

Визначення дефектного складу

основні рекомбінаційні центри в Cz-Si:B

– ВО-дефекти –

- пари Fe_iB_s другорядні в ОПЗ

$$N_{\text{Fe}}(t) = (N_{\text{Fe},0} - N_{\text{Fe},eq}) \exp \left[-\frac{t}{\tau_{\text{rep}}} \right] + N_{\text{Fe},eq}$$

$$\tau_{\text{rep}} = 770 \cdot p_p^{-2/3} \exp \left(\frac{E_{\text{D,Fe}}}{kT} \right)$$

17

КСЕ + УЗН

Визначення дефектного складу

основні рекомбінаційні центри в Cz-Si:B

– ВО-дефекти –

- пари Fe_iB_s другорядні в ОПЗ
- кисневмісні преципітати переважаючі в ОПЗ та КНО

$$E_v + 0.22 \text{ eV}$$

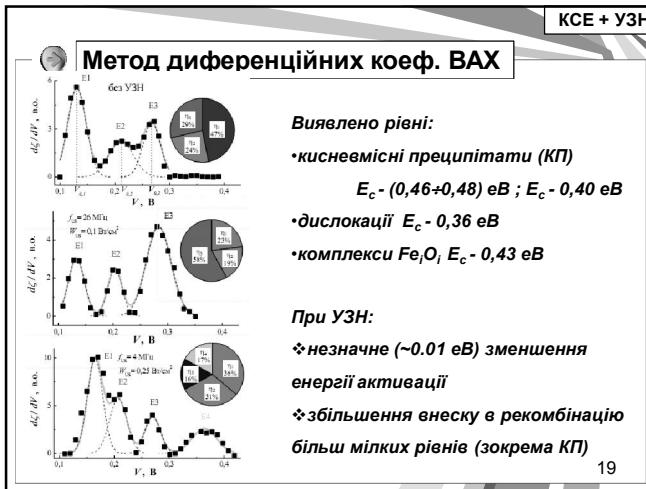
$$E_c - 0.08 \text{ eV}$$

$$\sigma_n / \sigma_p = 157$$

$$\sigma_p / \sigma_n = 1200$$

CDLR процес

18

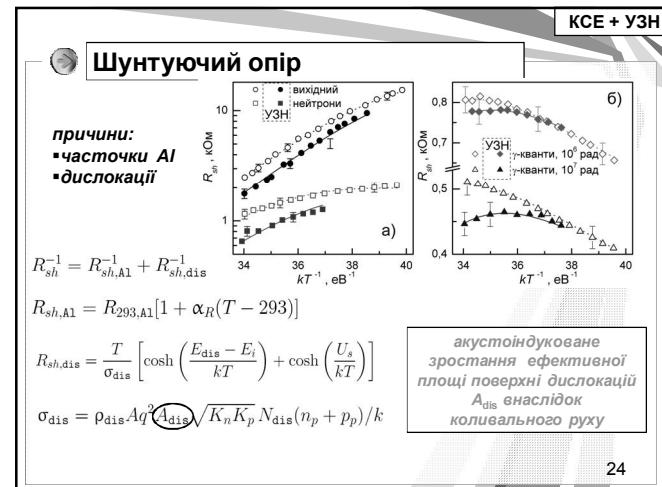
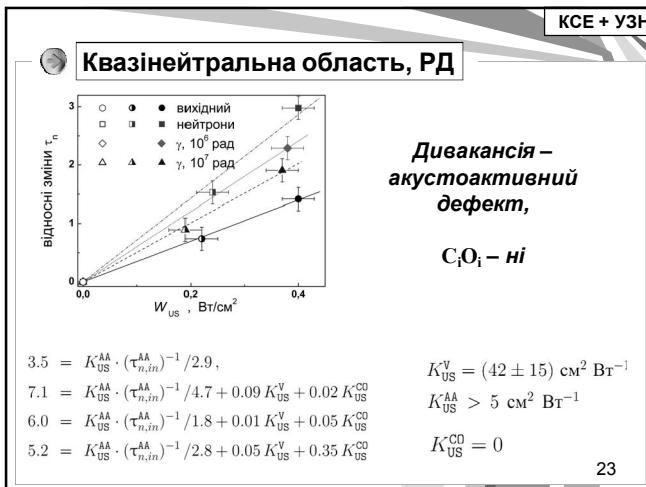
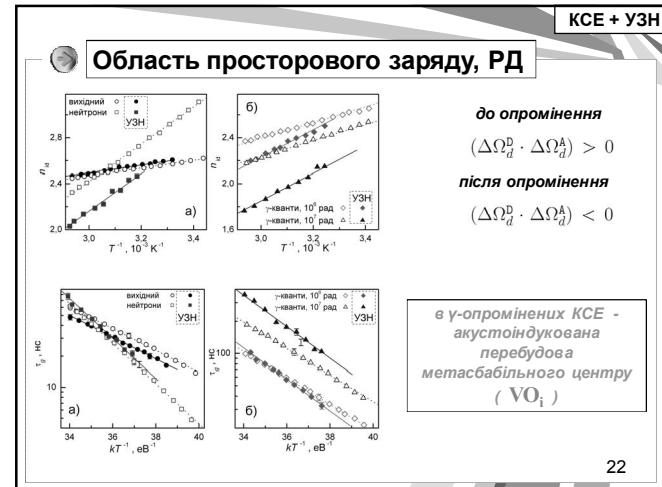
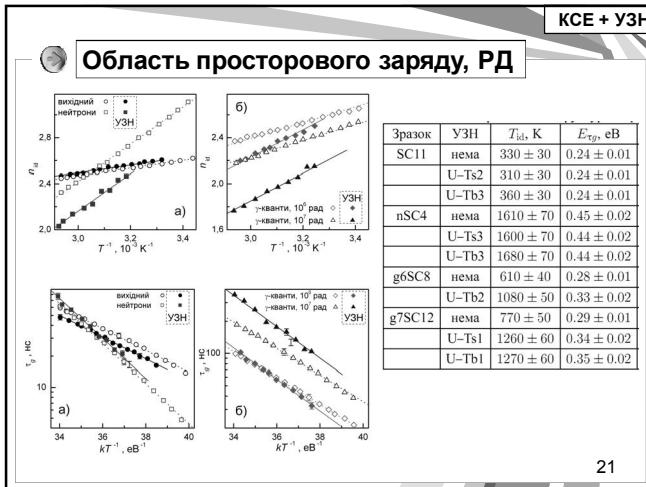


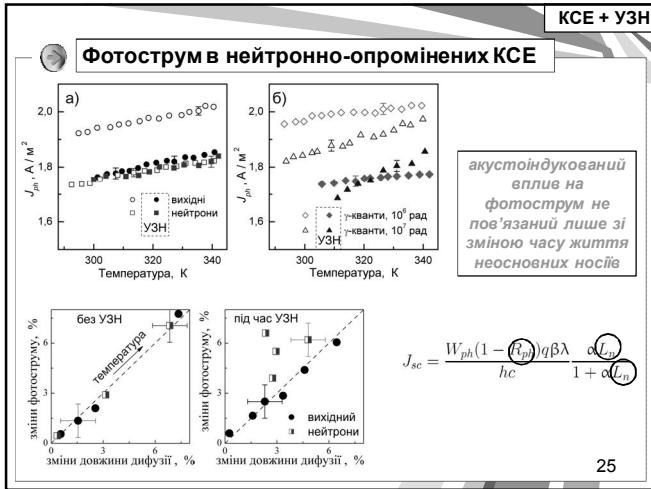
КСЕ + УЗН

Опромінення

	C_iO_i	V_2	V_3	VO_i	
реакторні нейтрони	$4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$	5,5	4,8	1,5	2
γ -кванти ${}^{60}\text{Co}$	10^6 рад	6	0,3	-	60
	10^7 рад	60	3	-	70

20





Порівняльний аналіз та оптимізація методів розрахунку параметрів структур метал–напівпровідник

26

Методи

Задача

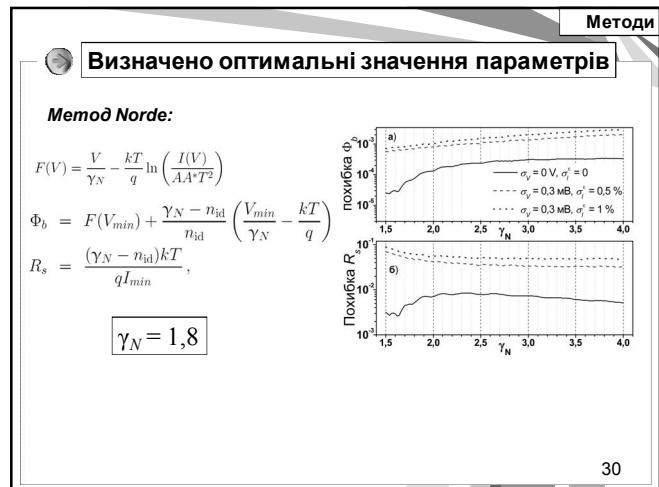
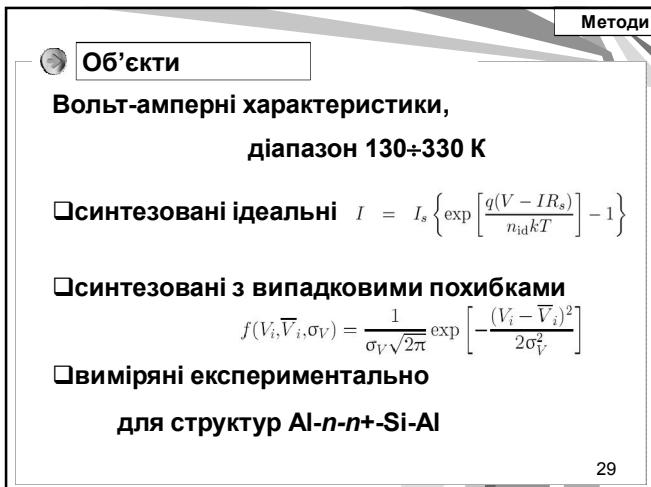
$$\begin{aligned} I &= I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{n_{id} kT} \right] - 1 \right\} = \\ &= AA^* T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_b}{kT} \right) \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{n_{id} kT} \right] - 1 \right\} \end{aligned}$$

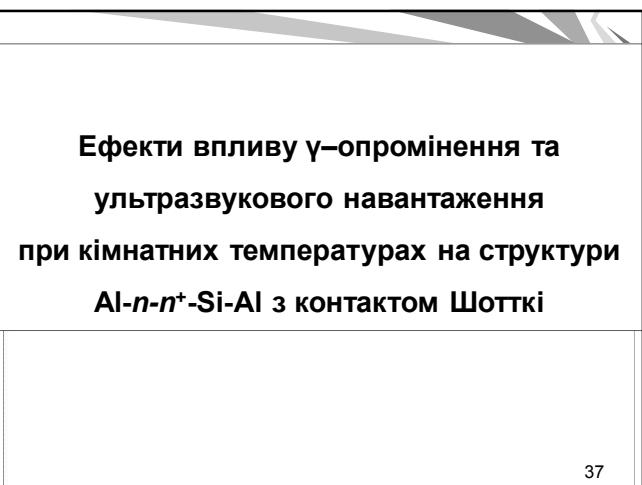
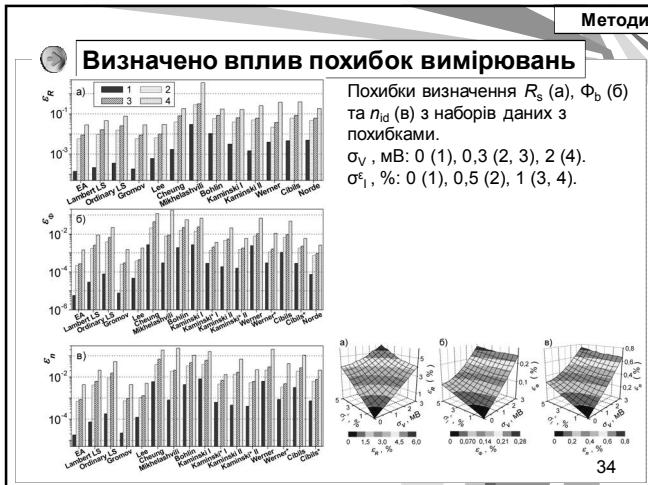
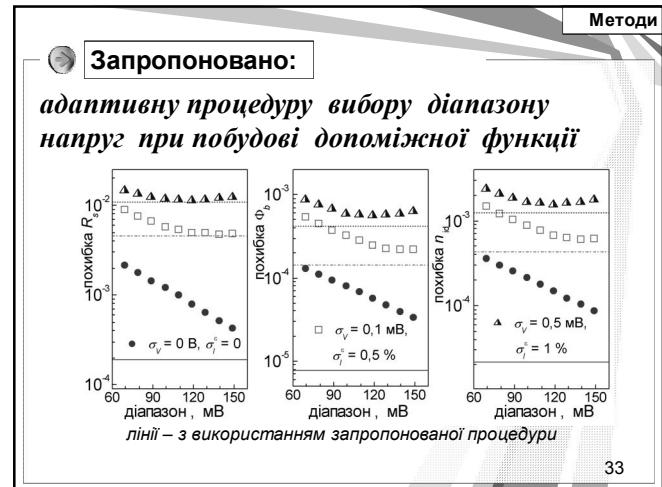
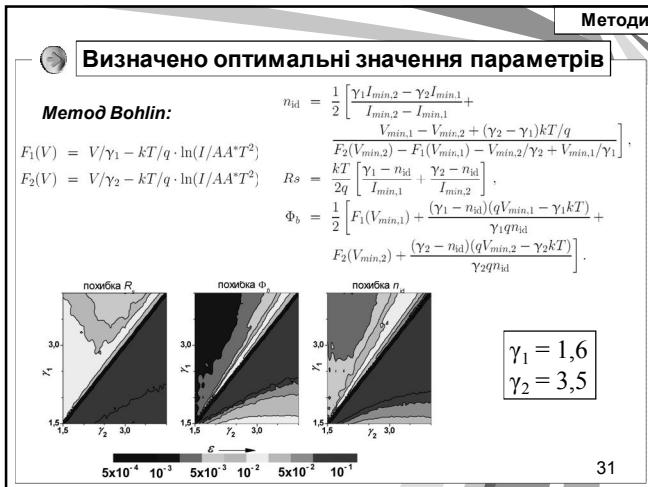
↓ ?!

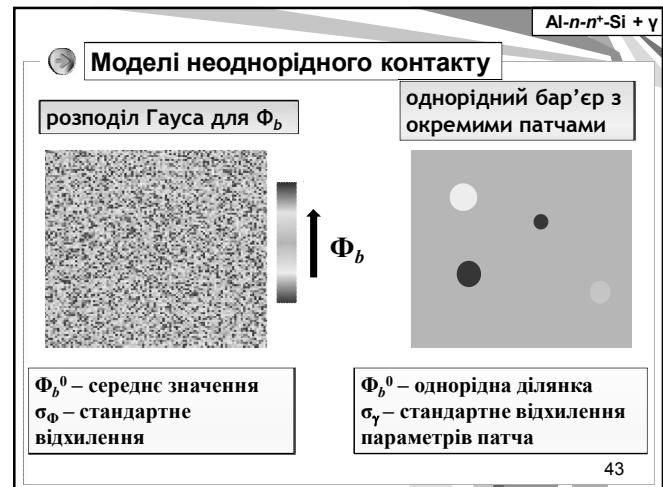
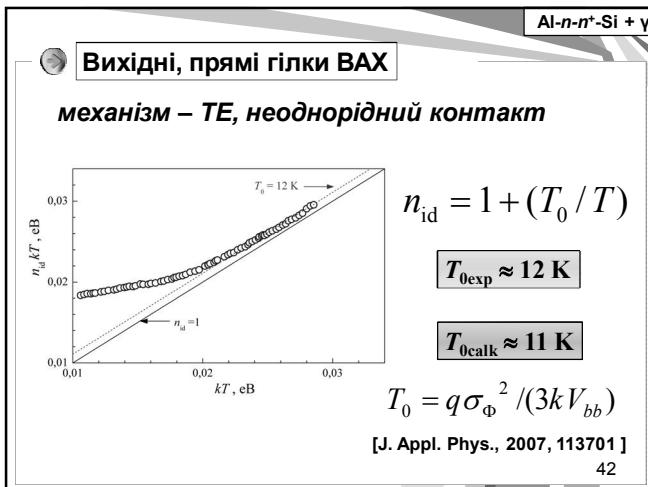
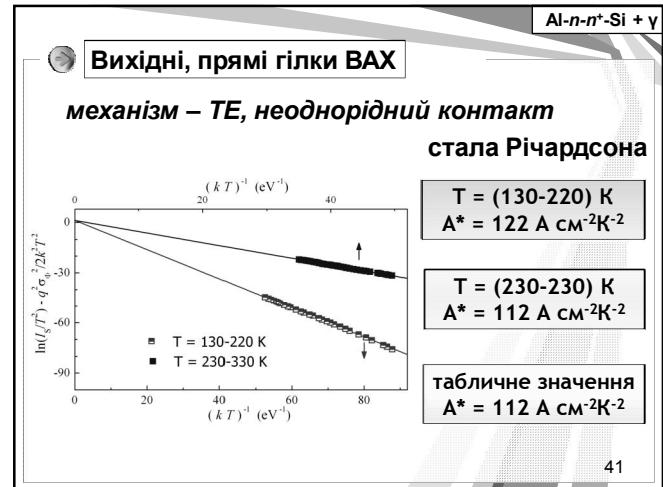
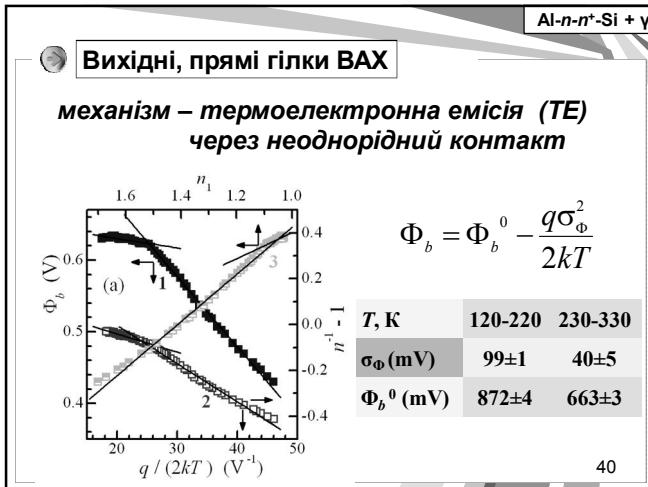
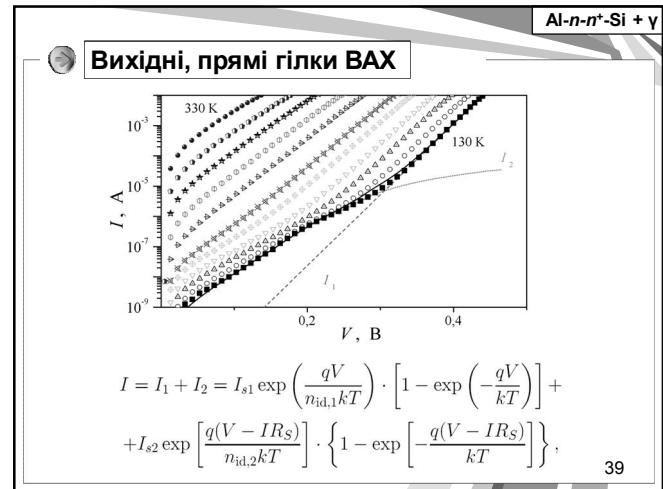
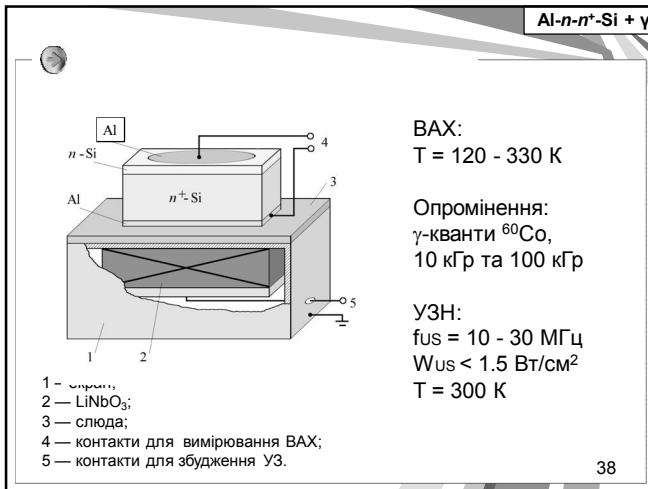
$$I_s(\Phi_b), \quad n_{id}, \quad R_s$$

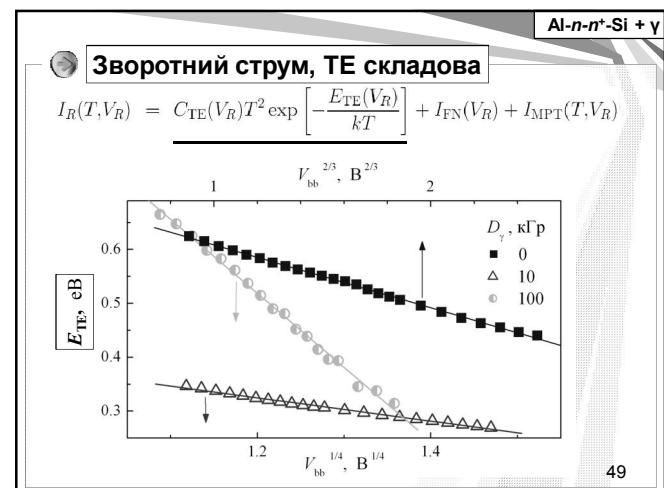
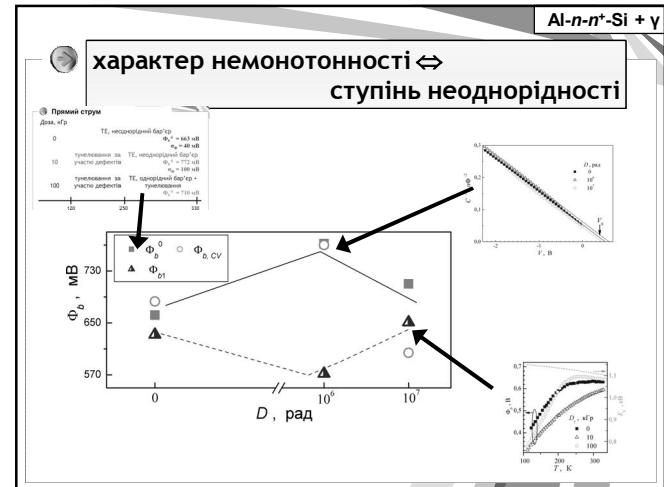
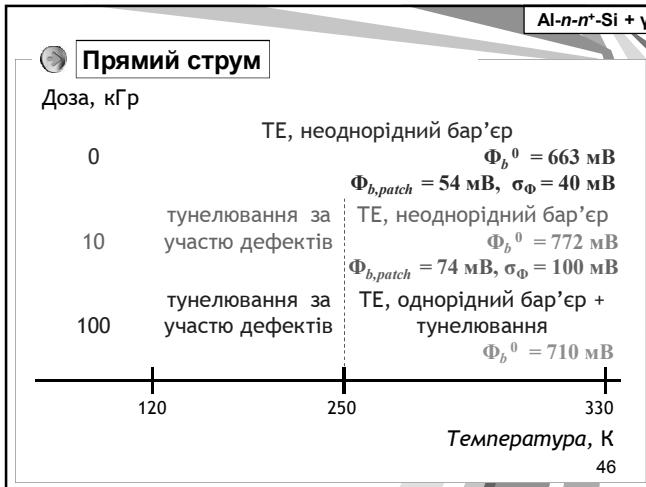
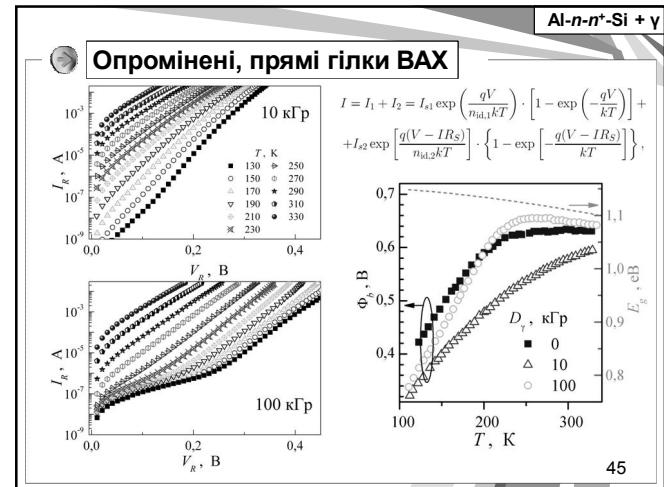
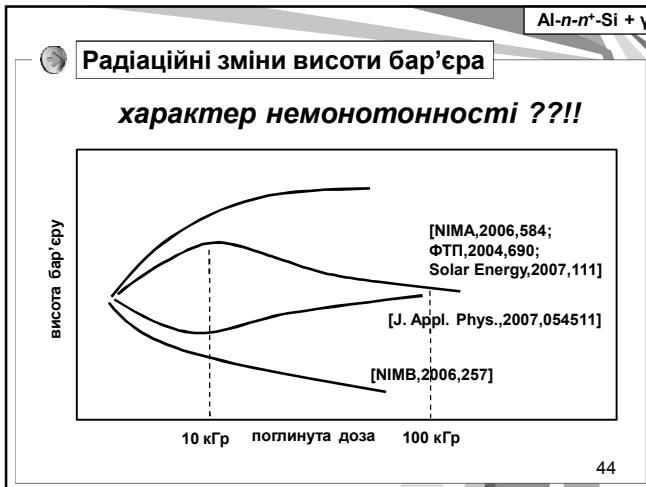
27

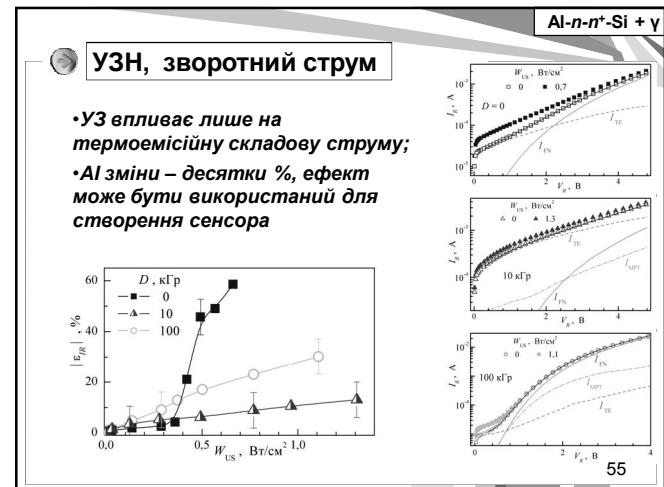
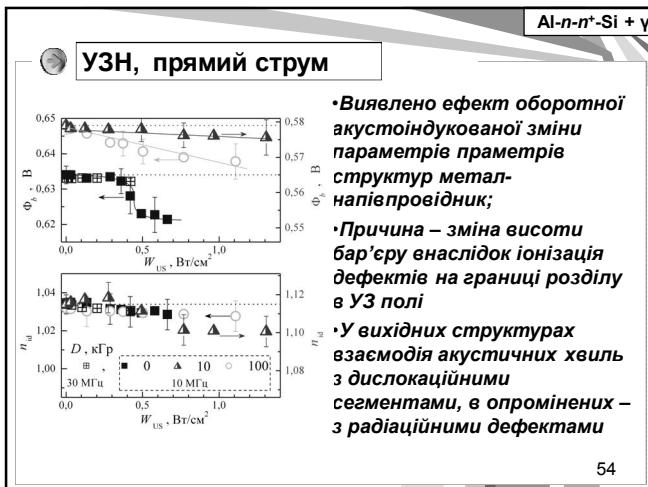
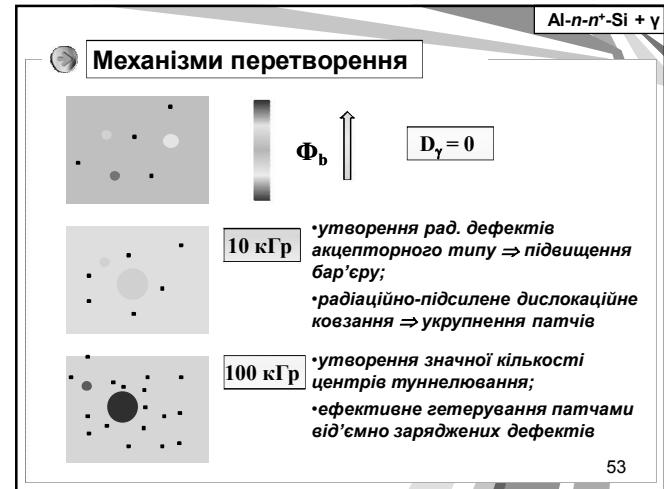
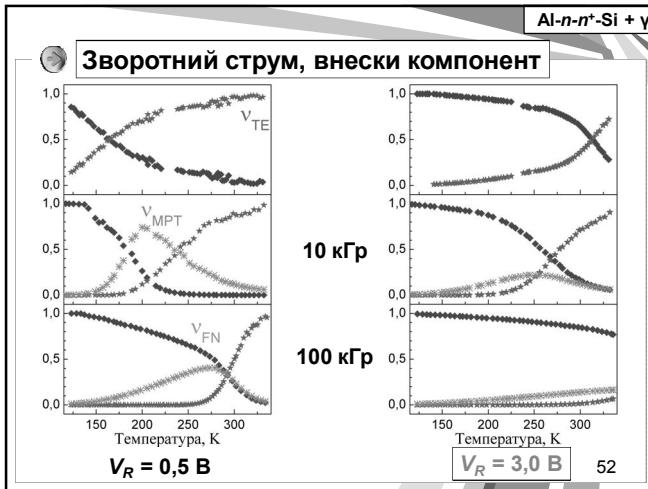
- Методи**
- 10 аналітичних**
 - Chung
 - Lee
 - Gromov
 - Kaminski I
 - Kaminski II
 - Cibils
 - Norde
 - Bohlin
 - Werner
 - Mikhelashvili
 - 2 чисельні (МНК)**
 - $I = I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{n_{id} kT} \right] - 1 \right\}$
 - $I(V) = \frac{n_{id} kT}{qR_s} W \left\{ \frac{qR_s}{n_{id} kT} \exp \left[\frac{q(V + R_s I_s)}{n_{id} kT} \right] \right\} + I_s$
 - 4 еволюційних алгоритми**
 - диференційної еволюції (DE),
 - оптимізації зграї частинок (PSO),
 - модифікованої штучної бджолиної сім'ї (MABC)
 - оптимізованого викладання та навчання (TLBO)
- 28

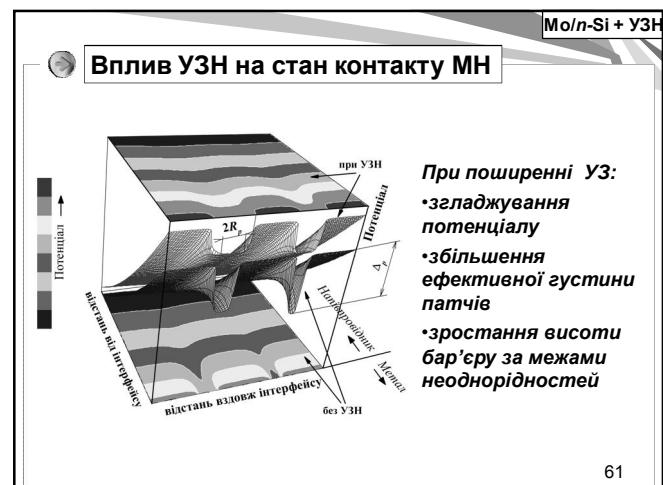
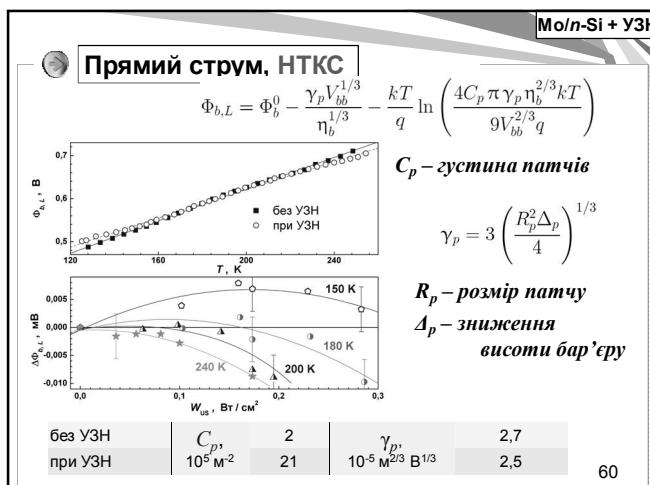
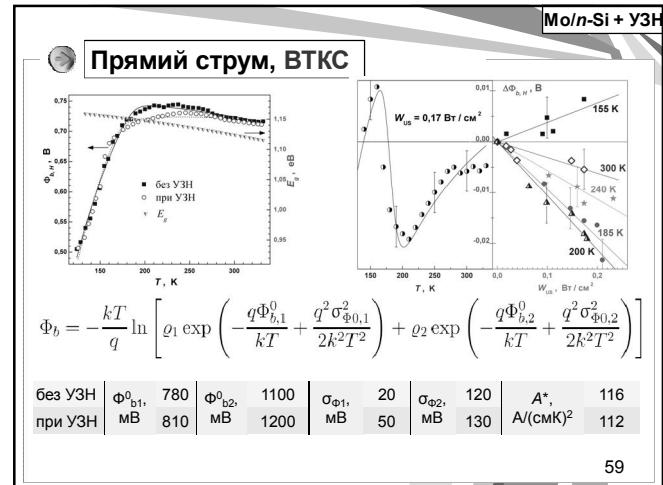
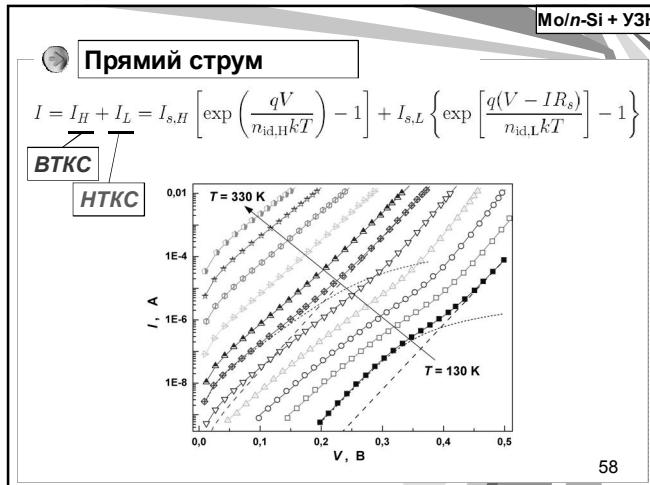
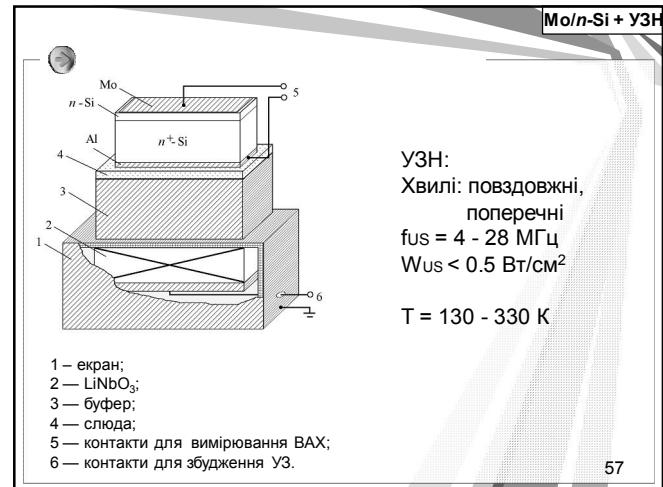
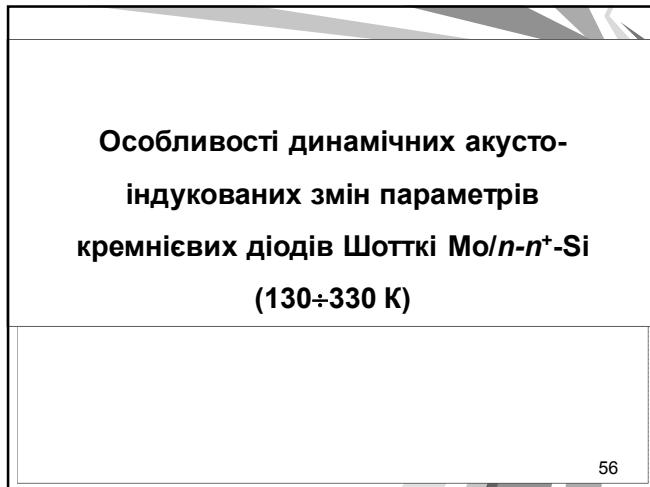


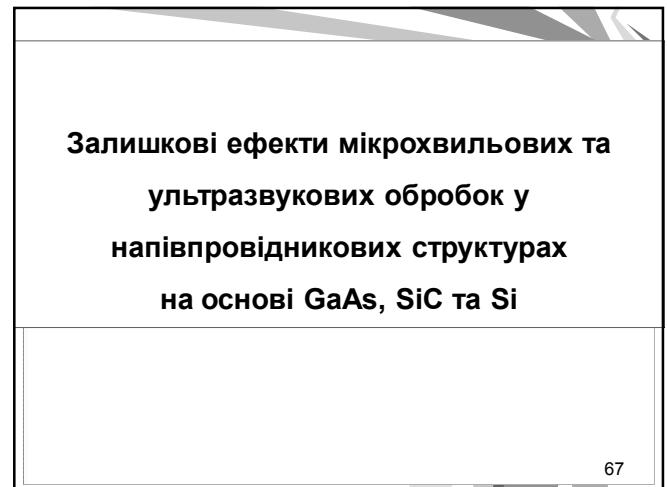
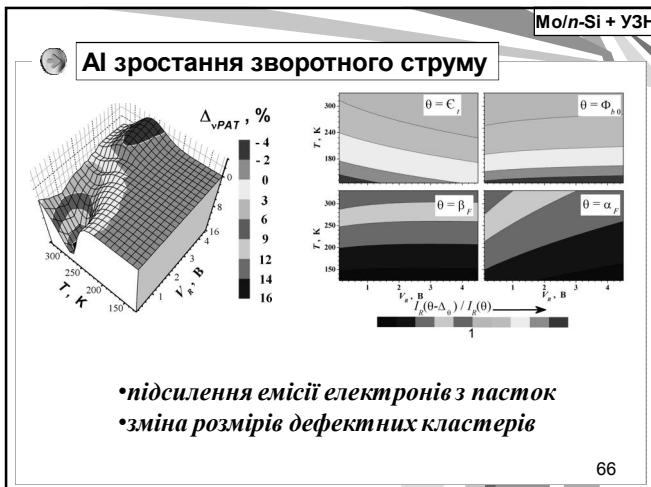
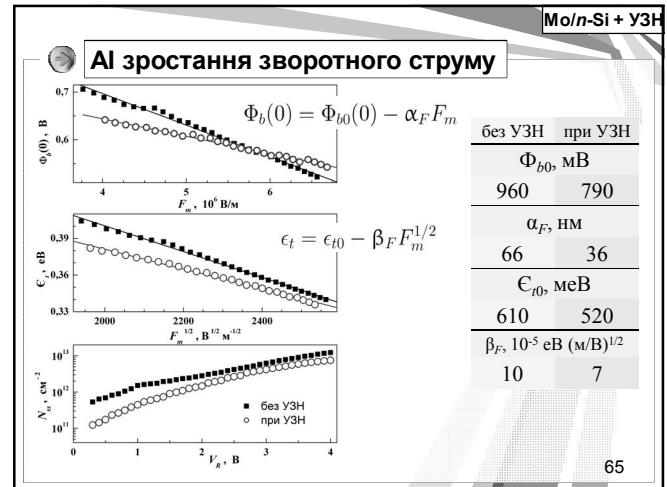
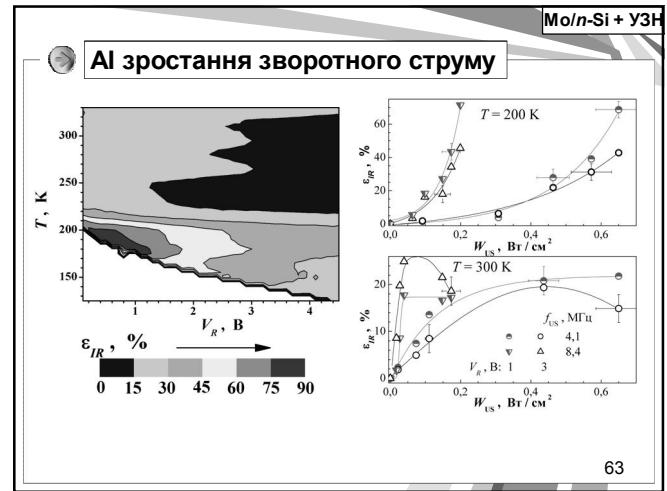
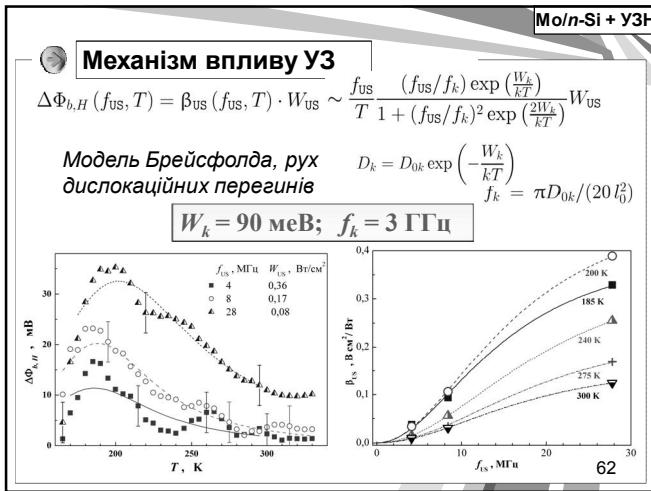








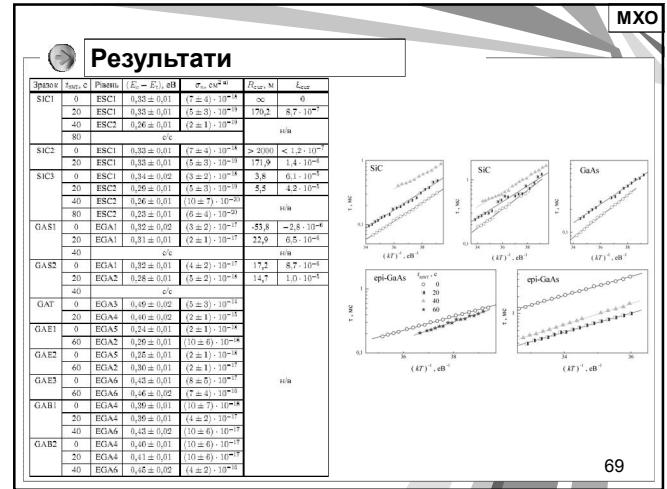




Вплив мікрохвильових обробок на дефектну підсистему

$f_{MWT} = 2,45 \text{ ГГц}$
 $W_{MWT} = 1,5 \text{ Вт}/\text{см}^2$
 $t_{MWT} \leq 80 \text{ с}$

68



Перетворення дефектів

МОНОКРИСТАЛИ

n-6H-SiC $V_{Si} V_C + V_{Si} V_C + C_i + C_i \rightarrow V_{Si} + V_{Si} \rightarrow V_{Si} V_{Si}$ [$E_c - 0,33 \text{ eV}$] $V_{Si} V_{Si} + Si_i + Si_i \rightarrow 0$ [$E_c - 0,29 \text{ eV}$]

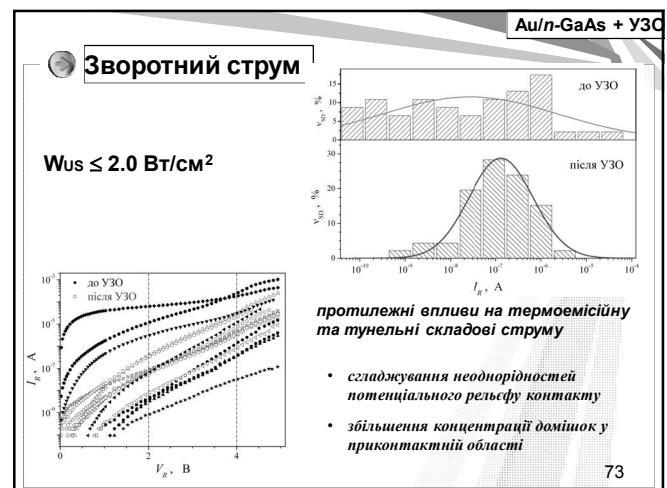
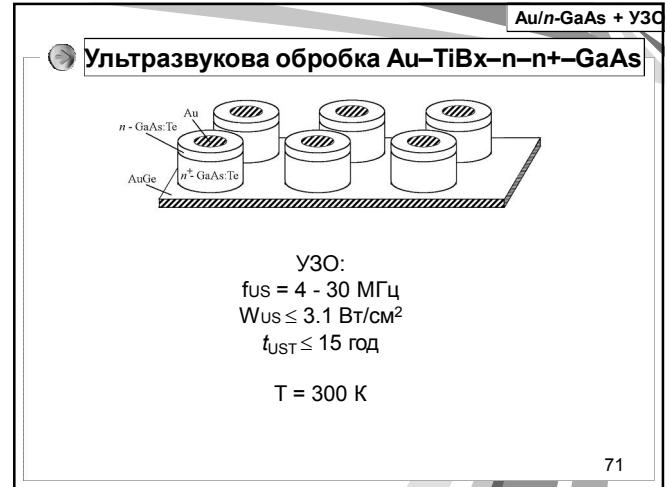
n-GaAs $V_{As} + As_i \rightarrow V_{As} As_i \rightarrow 0$ [$E_c - 0,32 \text{ eV}$] $V_{Ga} Ga_i V_{As} \rightarrow Ga_{Ga} V_{As} \rightarrow Ga_{As} V_{Ga}$ [$E_c - 0,49 \text{ eV}$] [$E_c - 0,40 \text{ eV}$]

ЕПІТАКСІЙНІ СТРУКТУРИ GaAs

$V_{Ga} V_{As} + Ga_i + As_i \rightarrow V_{As} As_i$ [$E_c - 0,24 \text{ eV}$] [$E_c - 0,29 \text{ eV}$]

$V_{Ga} Ga_{As} + As_i \rightarrow Ga_{Ga} V_{As} + As_i \rightarrow V_{As} As_i$ [$E_c - 0,40 \text{ eV}$] [$E_c - 0,45 \text{ eV}$]

70



Au/n-GaAs + УЗО

Прямий струм

$W_{US} > 2.5 \text{ Вт/см}^2$

- зростання фактору неідеальності
- зменшення висоти бар'єру
- сумісне підвищення зворотного струму

ГЕНЕРАЦІЯ ДЕФЕКТІВ

74

Si-SiO₂ + УЗО

Акустовідпали γ-опромінених структур Si-SiO₂-Au

γ-кванти ⁶⁰Co
 $D = 5 \cdot 10^7 \text{ рад}$

УЗО:
 $f_{US} = 4 \text{ МГц}$
 $W_{US} = 2 \text{ Вт/см}^2$
 $t_{UST} = 30\text{-}60 \text{ хв}$
 $T = 350 \text{ К}$

75

Si-SiO₂ + УЗО

Прямий струм

$I = I_0 V^{m_F}$

Стан структури

γ-опромінення	-	+	+	+
t_{UST} , хв	0	0	30	60

Параметр

m_F	1,3	1,6	1,8
I_0	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$

УЗО ⇒ відпали РД внаслідок пасивації ненасичених зв'язків атомами H, звуження енергетичного спектру пасток

76

Si-SiO₂ + УЗО

Зворотний струм

$I_R = I_{0,TAT} (U_d + V_R) \exp \left(-\frac{R_{TAT}}{F_m} \right)$

Стан структури

γ-опромінення	-	+	+	+
t_{UST} , хв	0	0	30	60

Параметр

$I_{0,TAT}$, відн.од.	1	0,14	0,04
U_d , В	0,73	0,44	0,12
R_{TAT} , відн.од.	1	0,54	0,33

УЗО ⇒ відпали РД внаслідок акустоіндукованої дифузії атомів кисню

77

Висновки

- Виявлено обортні акустоіндуковані деградації у кремнієвих сонячних елементах, як вихідних, так і опромінених нейtronами або γ-квантами.
- Запропоновано модель акустоактивного комплексного дефекту.
- Встановлено, що акусто-активними дефектами є кисневі мікрокластері, дівакансії та пари вакансія-кисень. Виявлено ефект акустоіндукованого зменшення шунтуючого опору та запропоновано його пояснення із застосуванням моделі дислокаційно-індукованого імпедансу.
- Проведено порівняльний аналіз та тестування 16 основних відомих методів визначення параметрів діодів Шоттки з вольт-амперних характеристик. Запропоновано адаптивну процедуру для оптимізації вибору діапазону ВАХ, який використовується для побудови допоміжних функцій при застосуванні аналітичних методів. Встановлено, що найбільш ефективними методами є еволюційні, метод Gromov з адаптивною процедурою та метод Lee.
- Встановлено механізми перенесення заряду в структурах Al-n-p⁺-Si-Al (120-330 K). Показано, що при дозі 10 кГр зміна електрофізичних параметрів відбувається внаслідок накопичення дефектів акцепторного типу на інтерфейсі та укрупнення патчів. При 100 кГр переважаючою є інтенсифікація процесу тунелювання внаслідок. Встановлено взаємозв'язок характеру дозової немонотонності зміни висоти бар'єру та ступеню неоднорідності контакту.

78

Висновки

- Виявлено обортні ефекти акустоіндукованого зменшення висоти бар'єру Шоттки та збільшення зворотного струму в структурах метал-напівпровідник на основі кремнію. Показано, що причинами ефекту є рух перегинів дислокацій невідповідності, зміна розмірів дислокаційних кластерів та (в опромінених структурах) перетворення радіаційних дефектів.
- Встановлено, що причинами перетворень, викликаних мікрохвилювим випроміненням в дефектній підсистемі арсенід галієвих структур та монокристалів карбіду кремнію є збільшення кількості міжузольних атомів у приповерхневому шарі.
- Встановлено, що ультразвукова обробка викликає збільшення однорідності параметрів арсенід галіевих діодів Шоттки, створених в єдиному технологічному процесі, та звуження енергетичного спектра радіаційно-індукованих пасток на інтерфейсі системи Si-SiO₂.

79