



КІЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

АКУСТО- ТА РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНІ ЯВИЩА В ПОВЕРХНЕВО-БАР'ЄРНИХ КРЕМНІЄВИХ ТА АРСЕНІД-ГАЛІЄВИХ СТРУКТУРАХ

ОЛІХ ОЛЕГ ЯРОСЛАВОВИЧ

Дисертація на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук
01.04.07 – фізики твердого тіла

Київ – 2018



Предмет дослідження

ефекти впливу ультразвукового навантаження та опромінення на процеси проходження струму та фотоелектричного перетворення у поверхнево-бар'єрних кремнієвих та арсенід-галієвих структурах

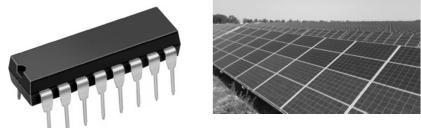


Мета

- встановлення основних закономірностей акусто-індукованих динамічних ефектів у кремнієвих структурах з $p-n$ -переходом та контактом Шотткі
- визначення фізичних механізмів впливу опромінення та ультразвукового навантаження на проходження струму в напівпровідниковых поверхнево-бар'єрних структурах



Актуальність

- Матеріал – основа мікроелектроніки та сонячної енергетики 
- Встановлення фізичних механізмів впливу зовнішніх факторів на експлуатаційні характеристики 
- Розробка нових методів керування властивостями бар'єрних структур, підвищення точності прогнозування поведінки у екстремальних умовах 
- З'ясування особливостей акусто-дефектної взаємодії при допороговій інтенсивності ультразвуку в малодислокаційних неп'єзоелектричних матеріалах 

3



Експериментальні та розрахункові методи

- аналіз вольт-амперних і вольт-фарадних характеристик;
- акустоелектрична релаксаційна спектроскопія;
- метод диференційних коефіцієнтів ВАХ для визначення параметрів глибоких рівнів;
- метод стаціонарного струму короткого замикання для визначення довжини дифузії неосновних носіїв;
- аналітичні та числові методи визначення параметрів діодів Шотткі; еволюційні алгоритми мінімізації функцій;
- імпульсний метод вимірювання поглинання акустичної хвилі;
- резонансний метод вимірювання імпедансу навантаженого акустичного перетворювача;
- профілометрія;
- рентгенівські дифрактометрія поверхні та топографія;
- контролюване радіаційне та мікрохвильове опромінення;
- метод ультразвукового навантаження.

4



Наукова новизна

- Виявлено оборотні ефекти впливу ультразвукового навантаження на електрофізичні властивості кремнієвих структур з *p-n*-переходом і контактом метал-напівпровідник та встановлено їх характеристики
- Встановлено відмінності 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 γ -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

5

ДИНАМІЧНІ АКУСТОІНДУКОВАНІ ЕФЕКТИ В ОПРОМІНЕНИХ ТА ВИХІДНИХ КРЕМНІЄВИХ СТРУКТУРАХ З *p-n*-ПЕРЕХОДОМ

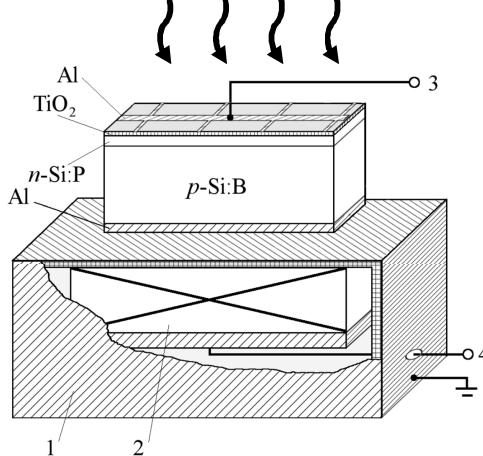
УЗН:

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

T = 290 - 330 K

Опромінення:

реакторні нейтрони $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$
 γ -кванти ${}^{60}\text{Co}$ 10^6 та 10^7 рад

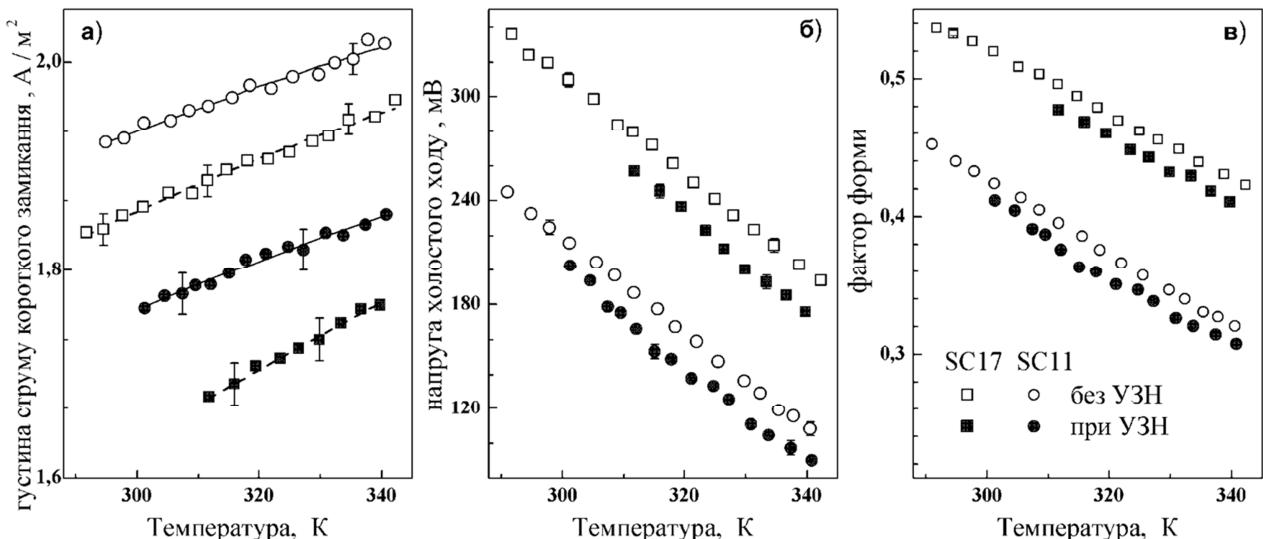


1 – екран; 2 — LiNbO_3 ;
 3 — контакти для вимірювання ВАХ;
 4 — контакти для збудження УЗ.

6

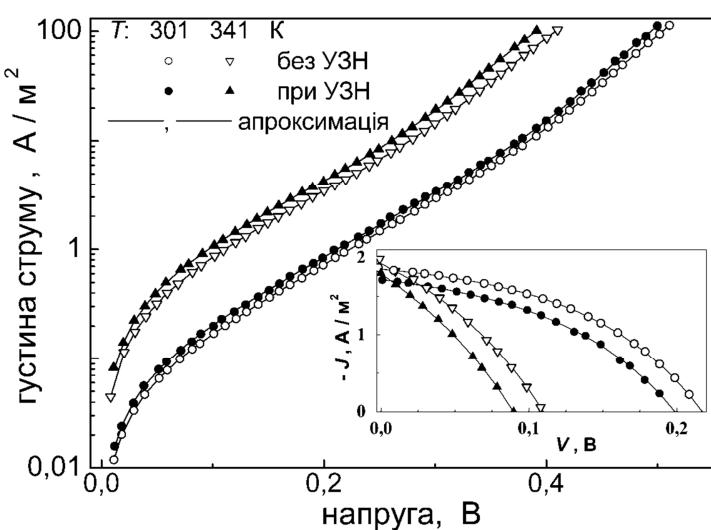
відомо: **LID** (світло) **PID** (напруга) **RID** (радіація)

виявлено: **USID** (ультразвук) --- ефект, оборотний
при кімнатних температурах



7

$$\begin{aligned}
 J(V, T) &= (I_{SCR} + I_{base} + I_{sh}) / A = \\
 &= -J_{ph} + \frac{qn_i d}{2\tau_g} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - JR_s)}{n_{id} kT} \right] - 1 \right\} + \\
 &\quad + \frac{qn_i^2}{p_p} \sqrt{\frac{\mu_n kT}{\tau_n}} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - JR_s)}{kT} \right] - 1 \right\} + \frac{V - JR_s}{R_{sh}}
 \end{aligned}$$



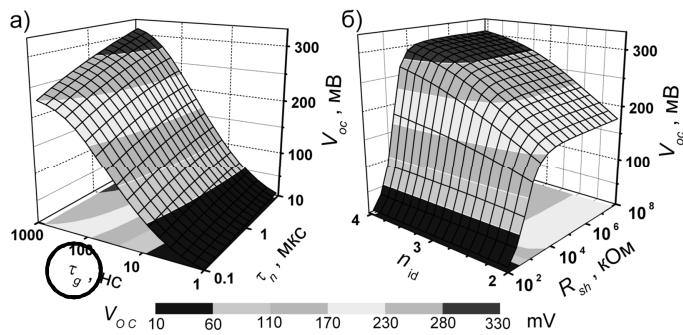
↓
апроксимація

$\tau_n, \tau_g, n_{id}, R_{sh}, R_s, J_{ph}$

8



Чисельний розрахунок V_{oc} та FF



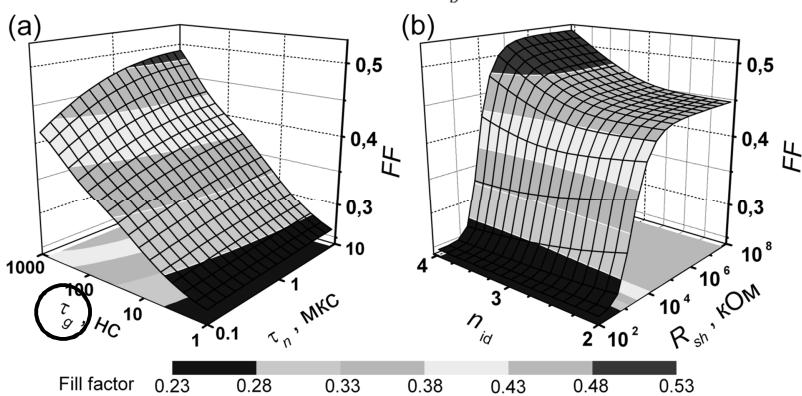
$$\tau_n = 3 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$R_{sh} = 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

$$\tau_g = 5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$$

$$J_{sc} = \frac{W_{ph}(1 - R_{ph})q\beta\lambda}{hc} \frac{\alpha L_n}{1 + \alpha L_n}$$

$$L_n = \sqrt{\mu_n kT \tau_n} q$$

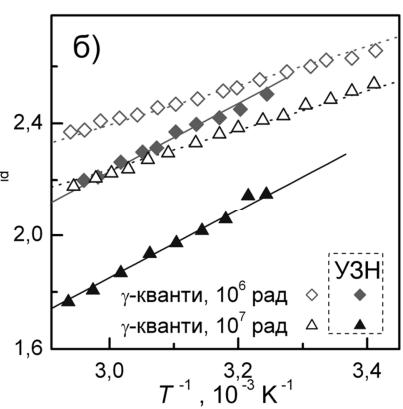
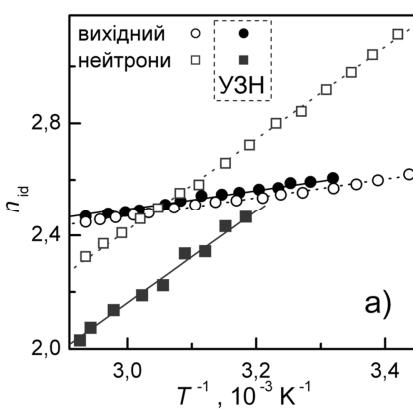


9



Область просторового заряду, РД

$$n_{id}(T) = n_{id,\infty} + T_{id}/T$$



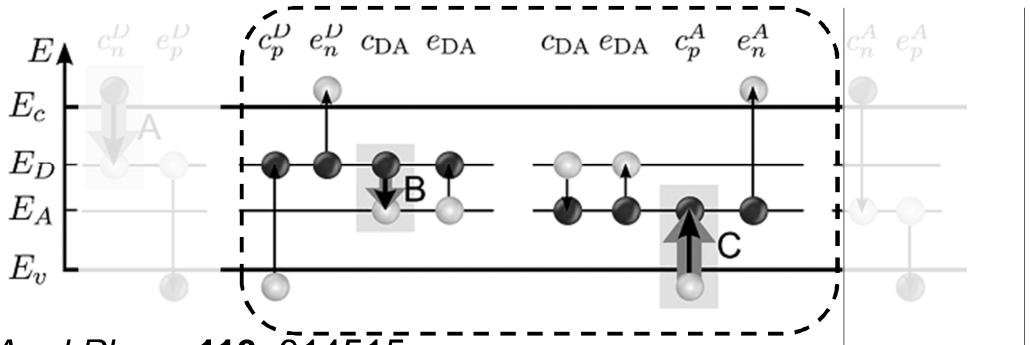
$$\tau_g(T) = \tau_{g0} \exp\left(-\frac{E_{\tau g}}{kT}\right)$$

10



Область просторового заряду

рекомбінація у системі спарених рівнів дефектів
(CDLR, coupled defect level recombination)



J.Appl.Phys., 110, 014515

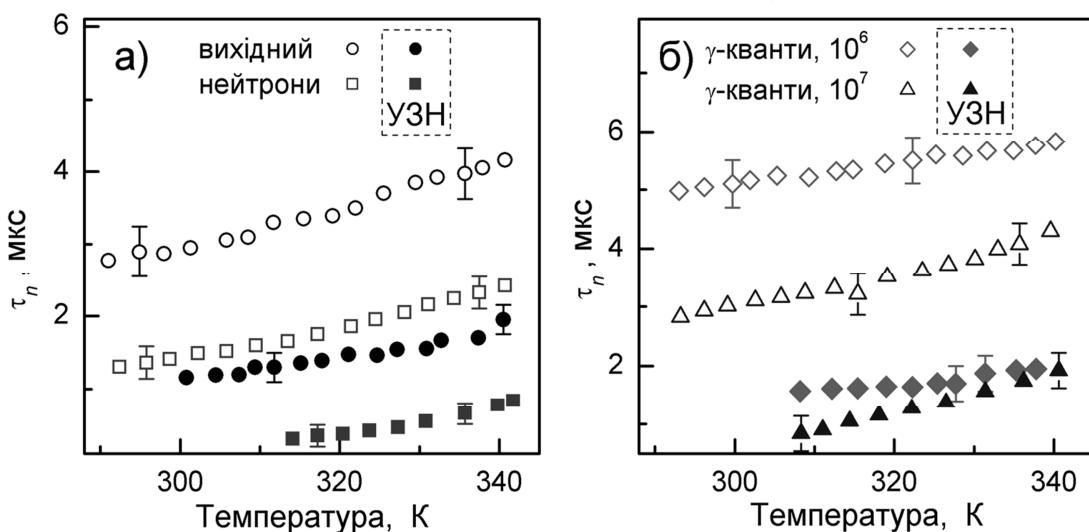
темпер рекомбінації: $R = \frac{R_{12} - \sqrt{R_{12}^2 - 4\tau_n^D \tau_p^A (np - n_i^2)(1 - \epsilon)}}{2\tau_n^D \tau_p^A (1 - \epsilon)}$,

параметр зв'язку $R_{12} = \frac{(n + n_D)(p + p_A)}{R_{DA}} + \tau_n^D(p + p_D) + \tau_p^A(n + n_A)$,
 $\tau_n^D = (N_D \sigma_n^D v_{th,n})^{-1}$, $\tau_p^A = (N_A \sigma_p^A v_{th,p})^{-1}$,

11



Квазі-нейтральна область



рекомбінація Шоклі-Ріда-Хола

$$\tau_n^{-1} = \sum_i^{M_d} \tau_{n,i}^{-1} = \sum_i^{M_d} N_{d,i} (\sigma_{n,i} v_{th,n})$$

експеримент:

$$\tau_{n,US}^{-1} = \tau_{n,in}^{-1} + K_{US} u_{US}^2$$

амплітуда зміщення атомів
при поширенні УЗ

12



Модель акустоактивного комплексного дефекту

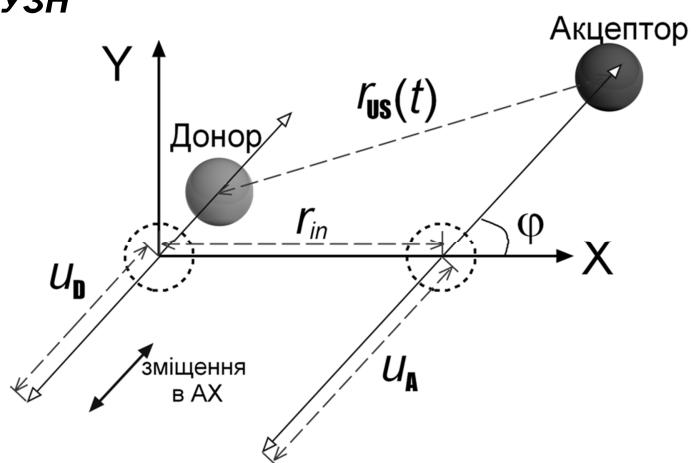
сила на точковий дефект під час УЗН

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

χ – об'ємний модуль пружності

$\Delta\Omega_d$ – зміна об'єму кристалу на один дефект

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



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

13



Модель акустоактивного комплексного дефекту

$$\sigma_{n,p}^{D,A}(r) = C_{n,p}^{D,A} r^2$$

$$R_{DA}(r) \sim N_D N_A \left[1 + \frac{r}{a_B} + \frac{1}{3} \left(\frac{r}{a_B} \right)^2 \right] e^{-r/a_0}$$

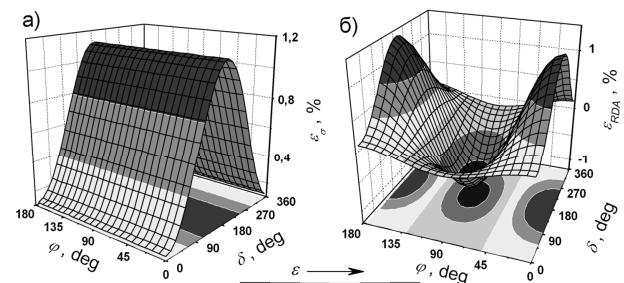
$$\varepsilon_\sigma = \frac{(u_D \pm u_A)^2}{2 r_{in}^2} = K_{US}^{DA} u_{US}^2$$

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

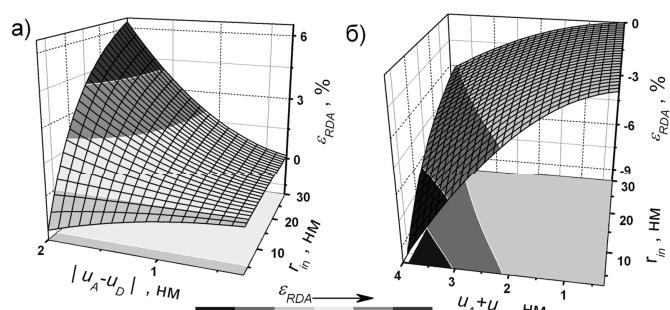
“-” при $(\Delta\Omega_d^D \cdot \Delta\Omega_d^A) > 0$

K_{US}^{DA} – характеризує взаємодію УЗ з комплексним дефектом

$$\tau_{n,US}^{-1} = \tau_{n,in}^{-1} + u_{US}^2 \sum_j M_d^{AA} N_{d,j} \sigma_{n,j}^{in} K_{US,j} v_{th,n} \quad \varphi = 0^\circ, \delta = 0^\circ \text{ (a) та } \varphi = 90^\circ, \delta = 180^\circ \text{ (б)}$$



$a_B = 3.23 \text{ нм}, r_{in} = 10 \text{ нм}, u_A = 1 \text{ нм} \text{ та } u_D = 0.5 \text{ нм}$



14

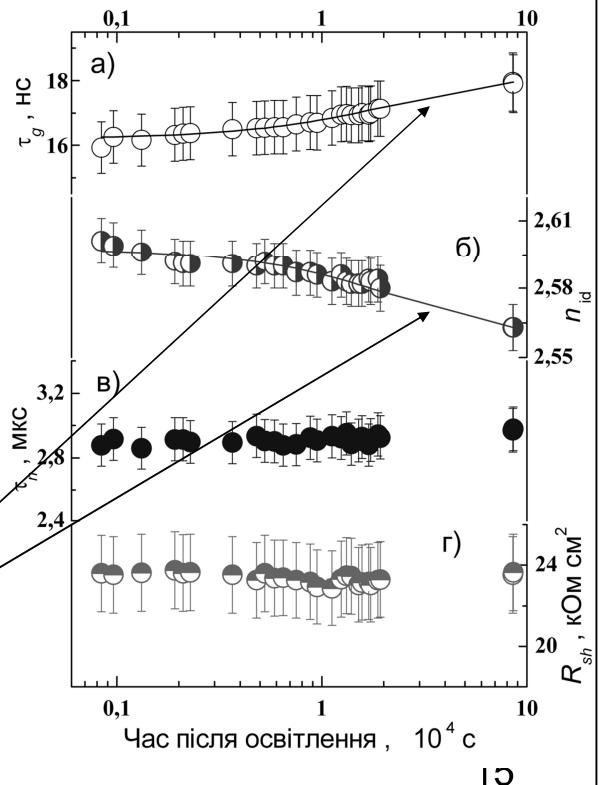


Оцінка дефектного складу

- дослідження необоротних змін внаслідок інтенсивного (2 sun) тривалого (до 16 год) освітлення та відпалу (200°C, 10 хв)
- вивчення кінетики оборотних змін після інтенсивного освітлення

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

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



Оцінка дефектного складу

Метод диференційних коеф. ВАХ

Виявлено рівні:

- кисневмісні преципітати (КП)

$$E_c - (0,46 \div 0,48) \text{ eV} ; E_c - 0,40 \text{ eV}$$

- дислокації $E_c - 0,36 \text{ eV}$

- комплекси Fe_iO_i $E_c - 0,43 \text{ eV}$

При УЗН:

- ❖ незначне (~0.01 eV) зменшення енергії активації
- ❖ збільшення внеску в рекомбінацію більш мілких рівнів (зокрема КП)



Оцінка дефектного складу

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

$$\left. \begin{array}{l} E_v + 0.22 \text{ eV} \quad \sigma_n/\sigma_p = 157 \\ E_c - 0.08 \text{ eV} \quad \sigma_p/\sigma_n = 1200 \end{array} \right\} \text{CDLR процес}$$

ОПРОМІНЕННЯ:

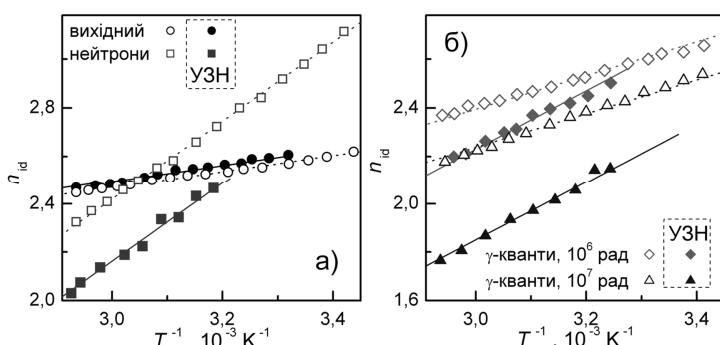
концентрація, 10^{11} см^{-3}

	C_iO_i	V_2	V_3	VO_i
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

17



Область просторового заряду + модель



до опромінення $(\Delta\Omega_d^D \cdot \Delta\Omega_d^A) > 0$

після $(\Delta\Omega_d^D \cdot \Delta\Omega_d^A) < 0$

в γ -опромінених КСЕ - акусто-індукована перебудова метастабільного центру (VO_i)



Квазінейтральна область + модель

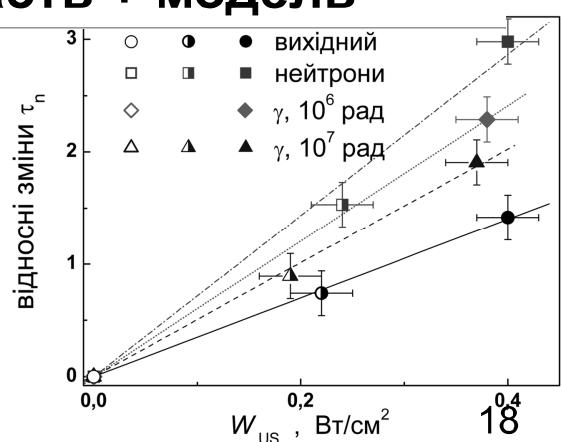
визначено коефіцієнти акусто-дефектної взаємодії

$$K_{\text{US}}^{\text{AA}} > 5 \text{ см}^2 \text{ Вт}^{-1}$$

$$K_{\text{US}}^{\text{CO}} = 0$$

$$K_{\text{US}}^{\text{V}} = (42 \pm 15) \text{ см}^2 \text{ Вт}^{-1}$$

Дивакансія – акустоактивний дефект,
 C_iO_i – ні



18

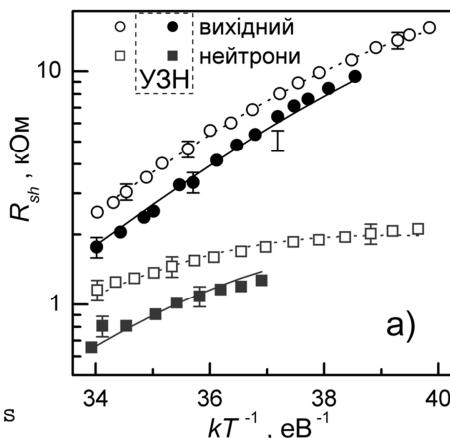


Шунтуючий опір

причини:

- часточки Al
- дислокаций

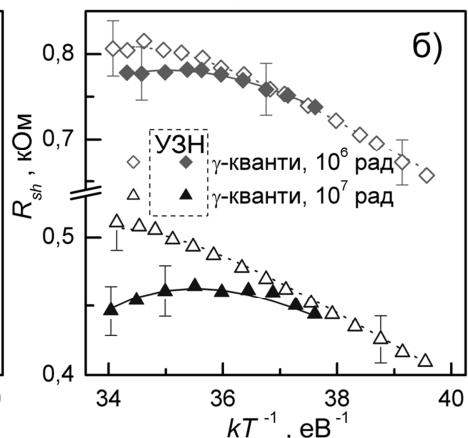
$$R_{sh}^{-1} = R_{sh,Al}^{-1} + R_{sh,dis}^{-1}$$



$$R_{sh,Al} = R_{293,Al}[1 + \alpha_R(T - 293)]$$

$$R_{sh,dis} = \frac{T}{\sigma_{dis}} \left[\cosh \left(\frac{E_{dis} - E_i}{kT} \right) + \cosh \left(\frac{U_s}{kT} \right) \right]$$

$$\sigma_{dis} = \rho_{dis} A q^2 \textcircled{A}_{dis} \sqrt{K_n K_p} N_{dis} (n_p + p_p) / k$$

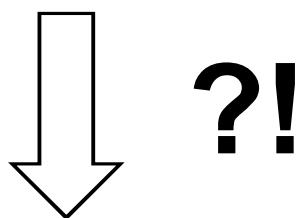


акустоіндуковане
зростання ефективної
площі поверхні дислокацій
 A_{dis} внаслідок
коливального руху

19

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУР МЕТАЛ–НАПІВПРОВІДНИК

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



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

20



Методи

- 10 аналітичних: •Chung •Lee •Gromov •Kaminski I
•Kaminski II •Cibils •Norde •Bohlin •Werner •Mikhelashvili

2 чисельні (МНК): • $I = I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{n_{id}kT} \right] - 1 \right\}$

$$\bullet 2I(V) = \frac{n_{id}kT}{qR_s} W \left\{ \frac{qR_s}{n_{id}kT} \exp \left[\frac{q(V + R_s I_s)}{n_{id}kT} \right] \right\} + I_s$$

- 4 еволюційних алгоритми: •диференційної еволюції
•оптимізації зграї частинок • штучної бджолиної сім'ї
• викладання та навчання



Об'єкти

вольт-амперні характеристики (130÷330 K)

- синтезовані з різним рівним випадкових похибок
- вимірювані експериментально (структурі Al-n-n+-Si)

21



Оптимізація

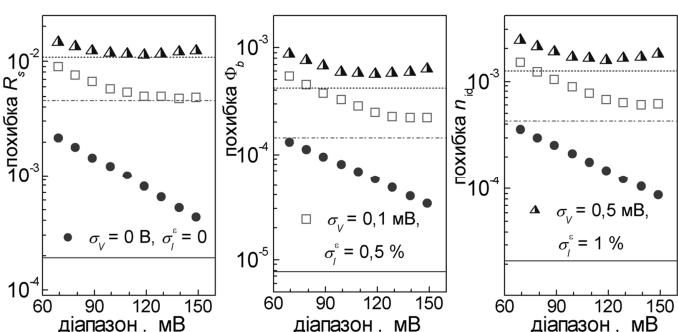
- ✓визначено оптимальні значення параметрів (методи Norde, Bohlin)

Метод Norde:

$$\gamma_N = 1,8$$

$$F(V) = \frac{V}{\gamma_N} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right)$$

- ✓модифіковано процедуру побудови допоміжної функції, що дозволяє проводити визначення в автоматичному режимі (метод Mikhelashvili)



лінії – з використанням процедури

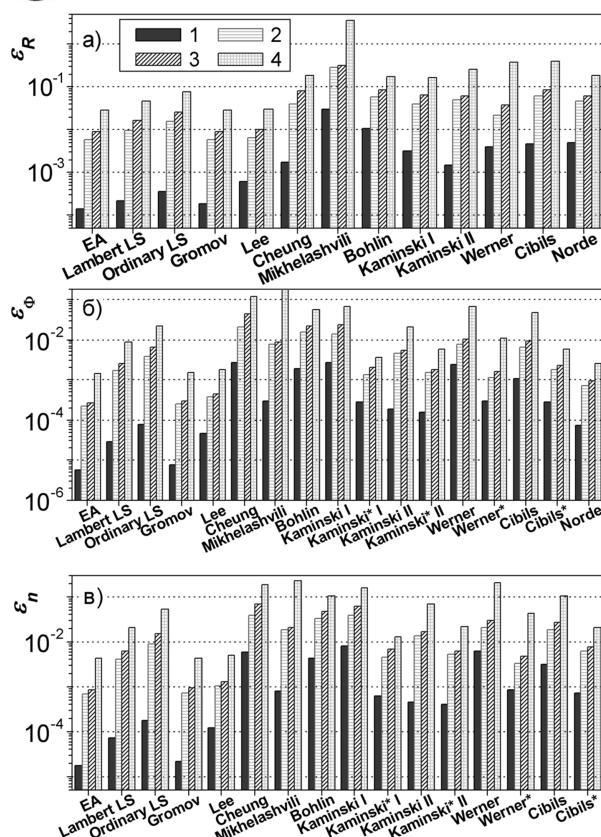
✓запропоновано адаптивну процедуру вибору діапазону напруг при побудові допоміжної функції (методи Gromov, Lee, Chung)

- ✓проведено визначення необхідної кількості поколінь для збіжності еволюційних алгоритмів

22

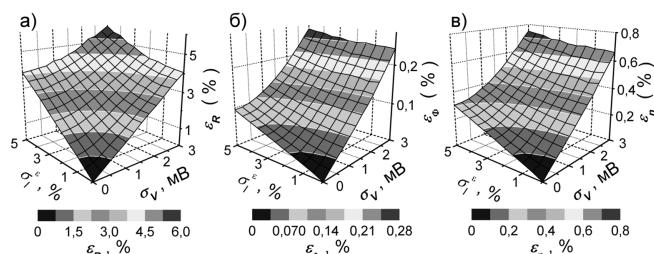


Визначено вплив похибок вимірювань



Похибки визначення R_s (а), Φ_b (б)
та n_{id} (в) з наборів даних з
похибками.

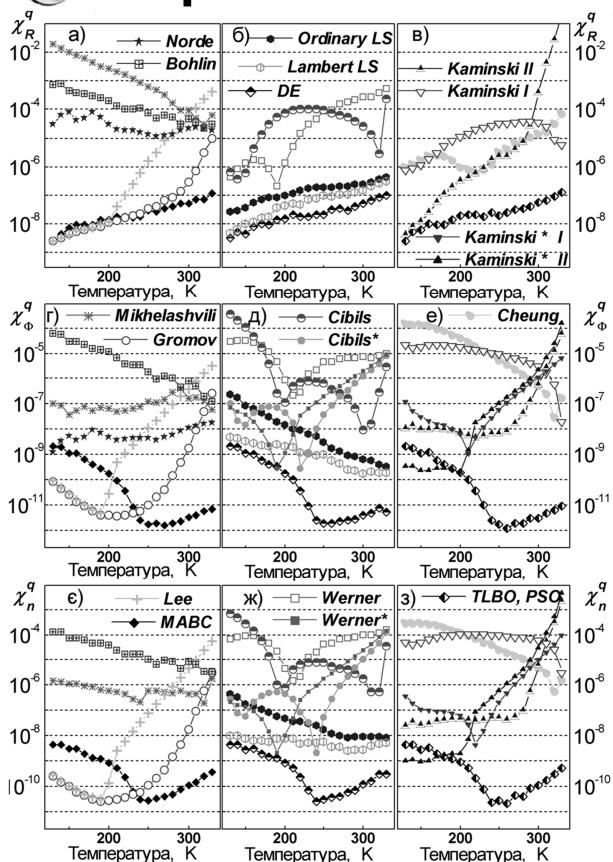
σ_V , мВ: 0 (1), 0,3 (2, 3), 2 (4).
 σ_ϵ , %: 0 (1), 0,5 (2), 1 (3, 4).



23



Порівняння точності та швидкодії



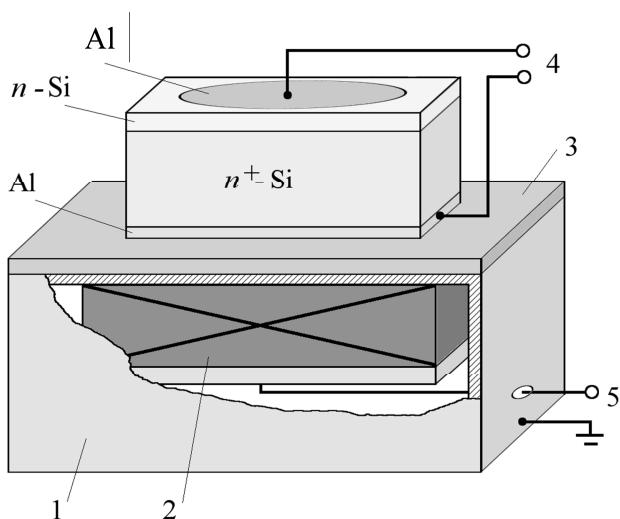
Метод	Час роботи, с	Метод	Час роботи, с
Norde	$(2.6 \div 3.7) \cdot 10^{-5}$	Werner	$(4.0 \div 4.5) \cdot 10^{-5}$
Cibils	$(0.2 \div 5.3) \cdot 10^{-3}$	Kaminskii I	$(4.5 \div 8.0) \cdot 10^{-5}$
Kaminskii II	$(0.3 \div 2.6) \cdot 10^{-3}$	Bohlin	$(4.0 \div 6.3) \cdot 10^{-5}$
Lee	$(0.2 \div 3.6) \cdot 10^{-3}$	Gromov	$2.2 \cdot 10^{-2}$
Cheung	$(2.0 \div 3.2) \cdot 10^{-5}$	Mikhelashvili	$(2.9 \div 4.7) \cdot 10^{-5}$
Ordinary LS	1,8 \div 460	Lambert LS	7,6 \div 540
DE	0,36 \div 0,73	PSO	0,14 \div 0,35
MABC	$5.7 \cdot 10^{-2} \div 0.20$	TLBO	5,4 \div 19,2

найефективніші:

- еволюційні алгоритми
- чисельні методи
- метод Gromov з адаптивною процедурою

24

ЕФЕКТИ ВПЛИВУ γ -ОПРОМІНЕННЯ ТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ КІМНАТНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ НА СТРУКТУРИ Al-n-n⁺-Si



ВАХ:
 $T = 120 - 330$ К

Опромінення:
 γ -кванти ^{60}Co ,
10 кГр та 100 кГр

УЗН:
 $f_{\text{us}} = 10 - 30$ МГц
 $W_{\text{us}} < 1.5$ Вт/см²
 $T = 305$ К

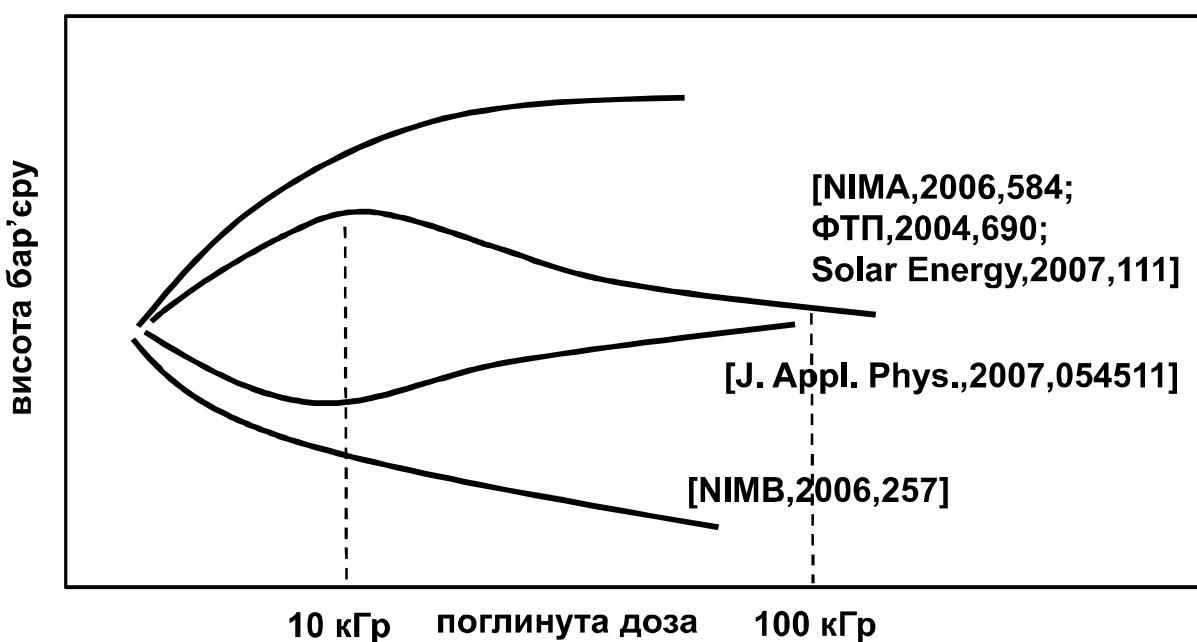
25

Al-n-n⁺-Si + γ



Радіаційні зміни висоти бар'єра

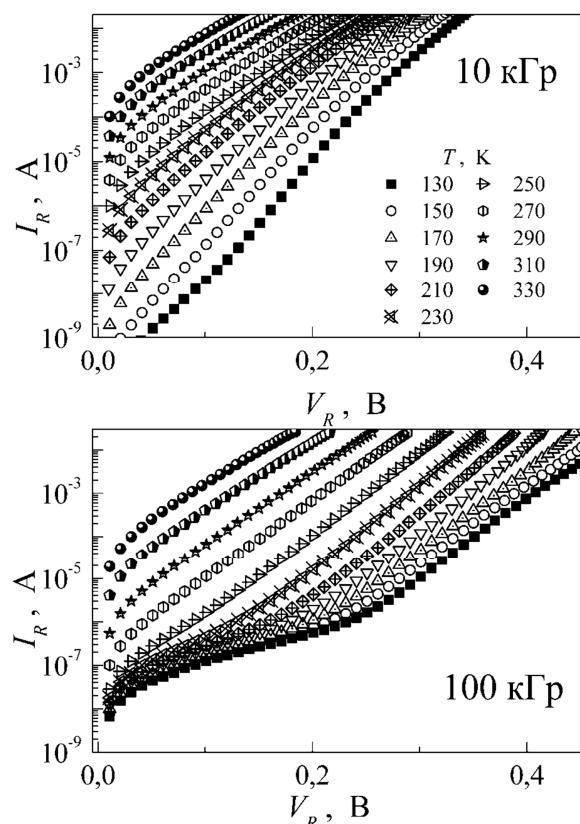
характер немонотонності ??!!



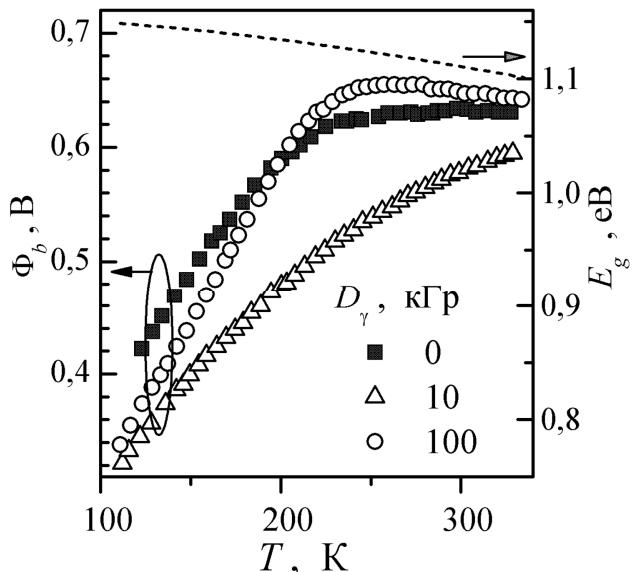
26



Опромінені, прямі гілки ВАХ



$$I = I_1 + I_2 = I_{s1} \exp\left(\frac{qV}{n_{id,1}kT}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] + \\ + I_{s2} \exp\left[\frac{q(V - IR_S)}{n_{id,2}kT}\right] \cdot \left\{1 - \exp\left[-\frac{q(V - IR_S)}{kT}\right]\right\},$$

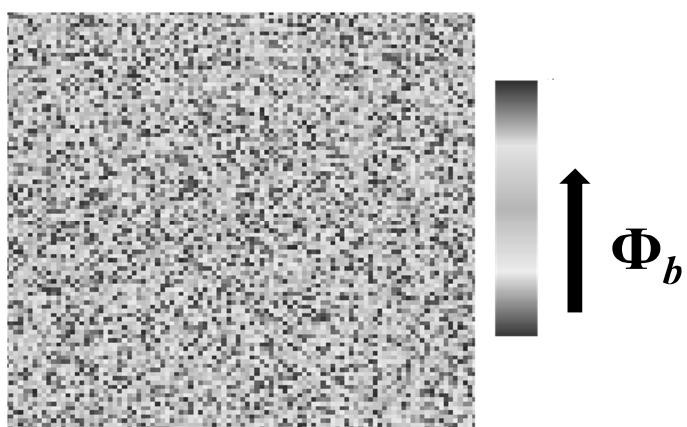


27



Моделі неоднорідного контакту

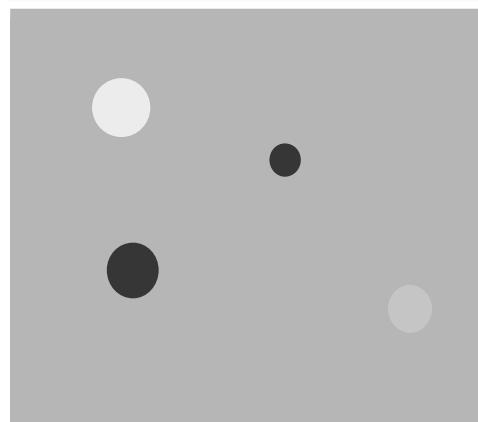
розподіл Гаусса для Φ_b



Φ_b^0 – середнє значення
 σ_Φ – стандартне відхилення

$$\Phi_b = \Phi_b^0 - \frac{q\sigma_\Phi^2}{2kT}$$

однорідний бар'єр з
окремими патчами



Φ_b^0 – однорідна ділянка
 σ_γ – стандартне відхилення
 параметрів патча

$$\sigma_\gamma = \sigma_\Phi (\eta/V_{bb})^{1/3}$$

28



Прямий струм

Доза, кГр

ТЕ, неоднорідний бар'єр

0

$$\Phi_b^0 = 663 \text{ мВ}$$

$$\Phi_{b,patch} = 54 \text{ мВ}, \sigma_\Phi = 40 \text{ мВ}$$

10

тунелювання за
участю дефектів

ТЕ, неоднорідний бар'єр

$$\Phi_b^0 = 772 \text{ мВ}$$

$$\Phi_{b,patch} = 74 \text{ мВ}, \sigma_\Phi = 100 \text{ мВ}$$

100

тунелювання за
участю дефектів

ТЕ, однорідний бар'єр +
тунелювання

$$\Phi_b^0 = 710 \text{ мВ}$$

120

250

330

Температура, К
29

характер немонотонності \Leftrightarrow ступінь неоднорідності

Прямий струм

Доза, кГр

ТЕ, неоднорідний бар'єр

$$\Phi_b^0 = 663 \text{ мВ}$$

$$\sigma_\Phi = 40 \text{ мВ}$$

0

10 тунелювання за
участю дефектів

100 тунелювання за
участю дефектів

TE, однорідний бар'єр +
тунелювання

$$\Phi_b^0 = 710 \text{ мВ}$$

0

10⁶

10⁷

10⁸

10⁹

10¹⁰

10¹¹

10¹²

10¹³

10¹⁴

10¹⁵

10¹⁶

10¹⁷

10¹⁸

10¹⁹

10²⁰

10²¹

10²²

10²³

10²⁴

10²⁵

10²⁶

10²⁷

10²⁸

10²⁹

10³⁰

10³¹

10³²

10³³

10³⁴

10³⁵

10³⁶

10³⁷

10³⁸

10³⁹

10⁴⁰

10⁴¹

10⁴²

10⁴³

10⁴⁴

10⁴⁵

10⁴⁶

10⁴⁷

10⁴⁸

10⁴⁹

10⁵⁰

10⁵¹

10⁵²

10⁵³

10⁵⁴

10⁵⁵

10⁵⁶

10⁵⁷

10⁵⁸

10⁵⁹

10⁶⁰

10⁶¹

10⁶²

10⁶³

10⁶⁴

10⁶⁵

10⁶⁶

10⁶⁷

10⁶⁸

10⁶⁹

10⁷⁰

10⁷¹

10⁷²

10⁷³

10⁷⁴

10⁷⁵

10⁷⁶

10⁷⁷

10⁷⁸

10⁷⁹

10⁸⁰

10⁸¹

10⁸²

10⁸³

10⁸⁴

10⁸⁵

10⁸⁶

10⁸⁷

10⁸⁸

10⁸⁹

10⁹⁰

10⁹¹

10⁹²

10⁹³

10⁹⁴

10⁹⁵

10⁹⁶

10⁹⁷

10⁹⁸

10⁹⁹

10¹⁰⁰

10¹⁰¹

10¹⁰²

10¹⁰³

10¹⁰⁴

10¹⁰⁵

10¹⁰⁶

10¹⁰⁷

10¹⁰⁸

10¹⁰⁹

10¹¹⁰

10¹¹¹

10¹¹²

10¹¹³

10¹¹⁴

10¹¹⁵

10¹¹⁶

10¹¹⁷

10¹¹⁸

10¹¹⁹

10¹²⁰

10¹²¹

10¹²²

10¹²³

10¹²⁴

10¹²⁵

10¹²⁶

10¹²⁷

10¹²⁸

10¹²⁹

10¹³⁰

10¹³¹

10¹³²

10¹³³

10¹³⁴

10¹³⁵

10¹³⁶

10¹³⁷

10¹³⁸

10¹³⁹

10¹⁴⁰

10¹⁴¹

10¹⁴²

10¹⁴³

10¹⁴⁴

10¹⁴⁵

10¹⁴⁶

10¹⁴⁷

10¹⁴⁸

10¹⁴⁹

10¹⁵⁰

10¹⁵¹

10¹⁵²

10¹⁵³

10¹⁵⁴

10¹⁵⁵

10¹⁵⁶

10¹⁵⁷

10¹⁵⁸

10¹⁵⁹

10¹⁶⁰

10¹⁶¹

10¹⁶²

10¹⁶³

10¹⁶⁴

10¹⁶⁵

10¹⁶⁶

10¹⁶⁷

10¹⁶⁸

10¹⁶⁹

10¹⁷⁰

10¹⁷¹

10¹⁷²

10¹⁷³

10¹⁷⁴

10¹⁷⁵

10¹⁷⁶

10¹⁷⁷

10¹⁷⁸

10¹⁷⁹

10¹⁸⁰

10¹⁸¹

10¹⁸²

10¹⁸³

10¹⁸⁴

10¹⁸⁵

10¹⁸⁶

10¹⁸⁷

10¹⁸⁸

10¹⁸⁹

10¹⁹⁰

10¹⁹¹

10¹⁹²

10¹⁹³

10¹⁹⁴

10¹⁹⁵

10¹⁹⁶

10¹⁹⁷

10¹⁹⁸

10¹⁹⁹

10²⁰⁰

10²⁰¹

10²⁰²

10²⁰³

10²⁰⁴

10²⁰⁵

10²⁰⁶

10²⁰⁷

10²⁰⁸

10²⁰⁹

10²¹⁰

10²¹¹

10²¹²

10²¹³

10²¹⁴

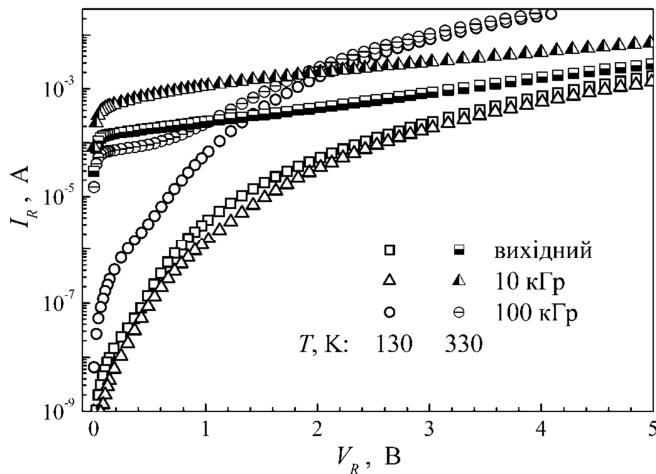
10²¹⁵

<p



Зворотний струм до опромінення

$$I_R(T, V_R) = \underbrace{C_{TE}(V_R)T^2 \exp\left[-\frac{E_{TE}(V_R)}{kT}\right]}_{\text{після опромінення}} + I_{FN}(V_R) + I_{MPT}(T, V_R)$$



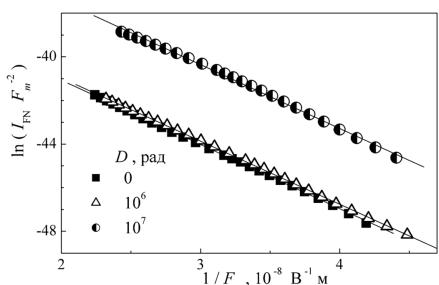
31



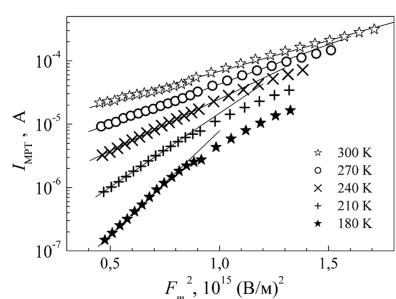
Зворотний струм

$$I_R(T, V_R) = \boxed{C_{TE}(V_R)T^2 \exp\left[-\frac{E_{TE}(V_R)}{kT}\right]} + \boxed{I_{FN}(V_R)} + \boxed{I_{MPT}(T, V_R)}$$

термоелектронна емісія



**пряме тунелювання
за участю рівня
міжузлового атому
вуглецю**

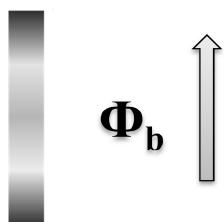
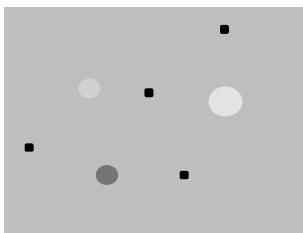


**тунельна багатофононна
іонізація домішкових
центрів**

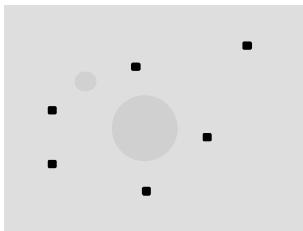
32



Механізми перетворення

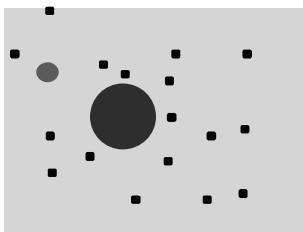


$$D_\gamma = 0$$



10 кГр

- утворення рад. дефектів акцепторного типу ⇒ підвищення бар'єру;
- радіаційно-підсилене дислокаційне ковзання ⇒ укрупнення патчів



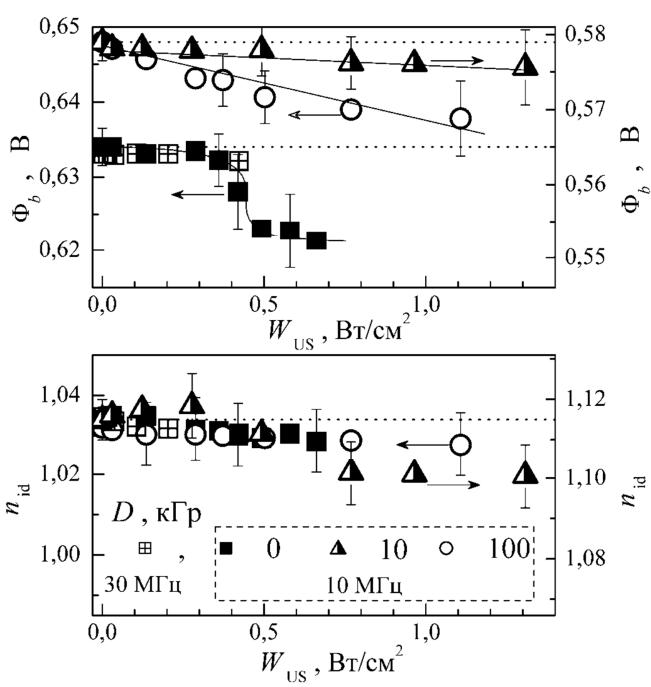
100 кГр

- утворення значної кількості центрів туннелювання;
- ефективне гетерування патчами від'ємно заряджених дефектів

33



УЗ навантаження, прямий струм



- Виявлено ефект оборотної акустоіндукованої зміни параметрів параметрів структур метал-напівпровідник;
- Причина – зміна висоти бар'єру внаслідок іонізації дефектів на границі розділу в УЗ полі
- У вихідних структурах взаємодія акустичних хвиль з дислокаційними сегментами, в опромінених – з радіаційними дефектами

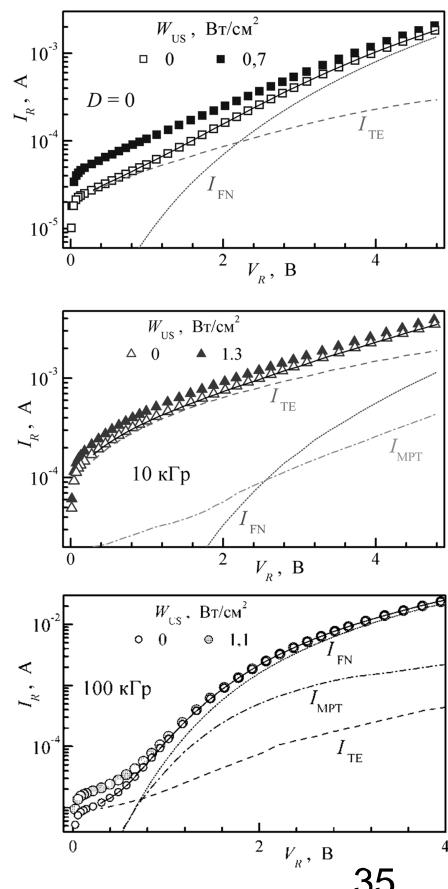
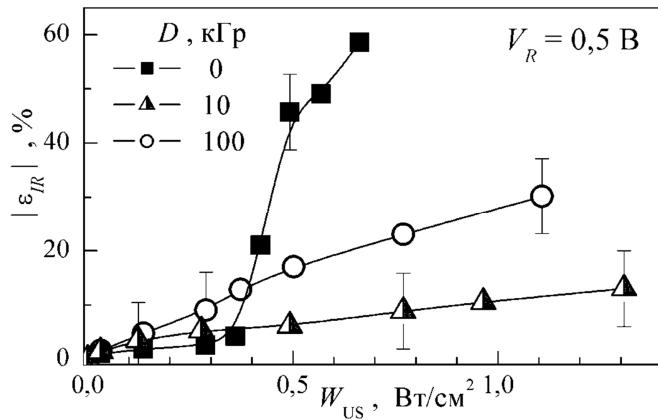
T = 305 K

34



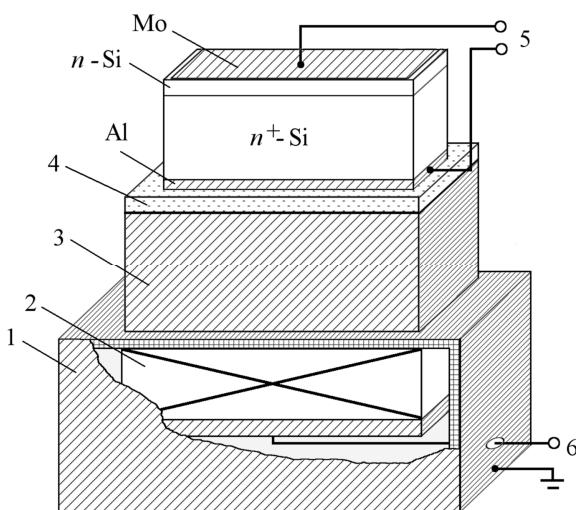
УЗН, зворотний струм

- УЗ впливає лише на термоемісійну складову струму;
- величина Al змін – десятки відсотків



35

ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІЧНИХ АКУСТОІНДУКОВАНИХ ЗМІН ПАРАМЕТРІВ КРЕМНІСВИХ ДІОДІВ ШОТТКІ Mo-n-n⁺-Si (130÷330 K)



УЗН:
 $f_{US} = 4 - 28 \text{ МГц}$
 $W_{US} < 0.5 \text{ Вт}/\text{см}^2$
 $T = 130 - 330 \text{ K}$

1 – екран; 2 – LiNbO_3 ; 3 – буфер;
4 – слюда; 5 – контакти для
вимірювання ВАХ; 6 – контакти для
збудження УЗ.

36

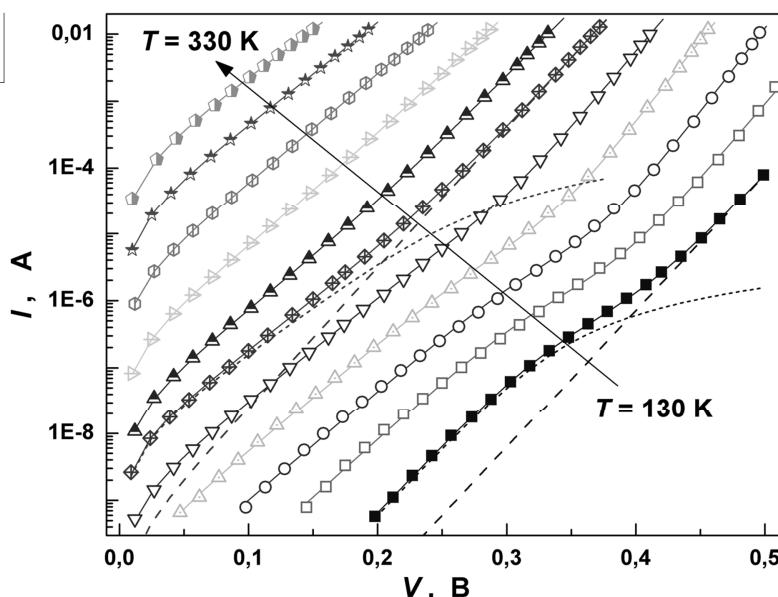


Прямий струм

$$I = I_H + I_L = I_{s,H} \left[\exp \left(\frac{qV}{n_{id,H} kT} \right) - 1 \right] + I_{s,L} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{n_{id,L} kT} \right] - 1 \right\}$$

ВТКС

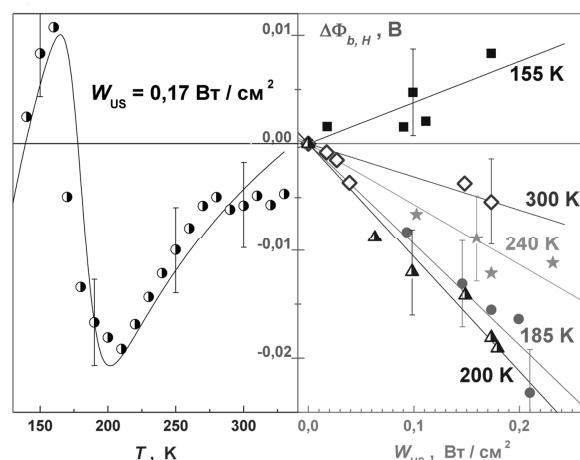
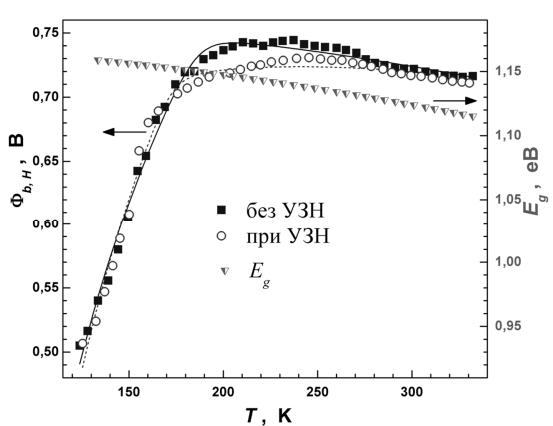
НТКС



37



Прямий струм, ВТКС



$$\Phi_b = -\frac{kT}{q} \ln \left[\varrho_1 \exp \left(-\frac{q\Phi_{b,1}^0}{kT} + \frac{q^2 \sigma_{\Phi,1}^2}{2k^2 T^2} \right) + \varrho_2 \exp \left(-\frac{q\Phi_{b,2}^0}{kT} + \frac{q^2 \sigma_{\Phi,2}^2}{2k^2 T^2} \right) \right]$$

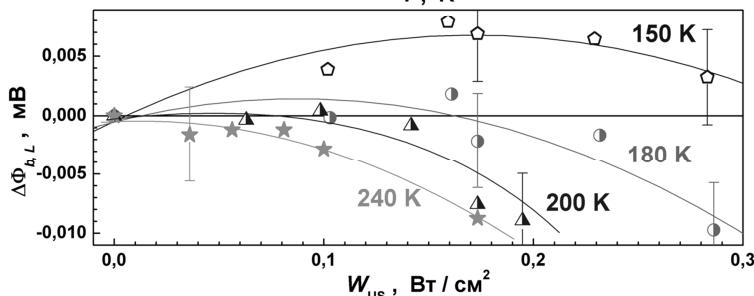
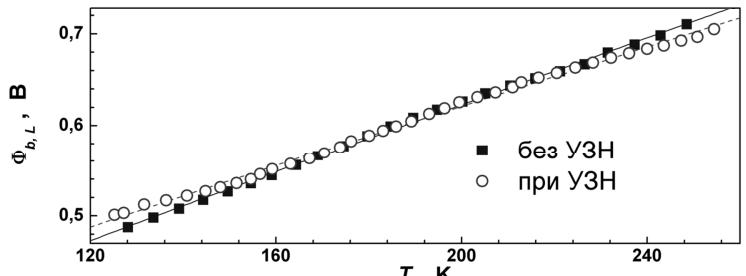
без УЗН	Φ_{b1}^0 , мВ	780	Φ_{b2}^0 , мВ	1100	$\sigma_{\Phi 1}$, мВ	20	$\sigma_{\Phi 2}$, мВ	120	A^* , $A/(cmK)^2$	116
при УЗН		810		1200		50		130		112

38



Прямий струм, НТКС

$$\Phi_{b,L} = \Phi_b^0 - \frac{\gamma_p V_{bb}^{1/3}}{\eta_b^{1/3}} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{4C_p \pi \gamma_p \eta_b^{2/3} kT}{9V_{bb}^{2/3} q} \right)$$



без УЗН

при УЗН

$$C_p, 10^5 \text{ M}^{-2}$$

2	21
---	----

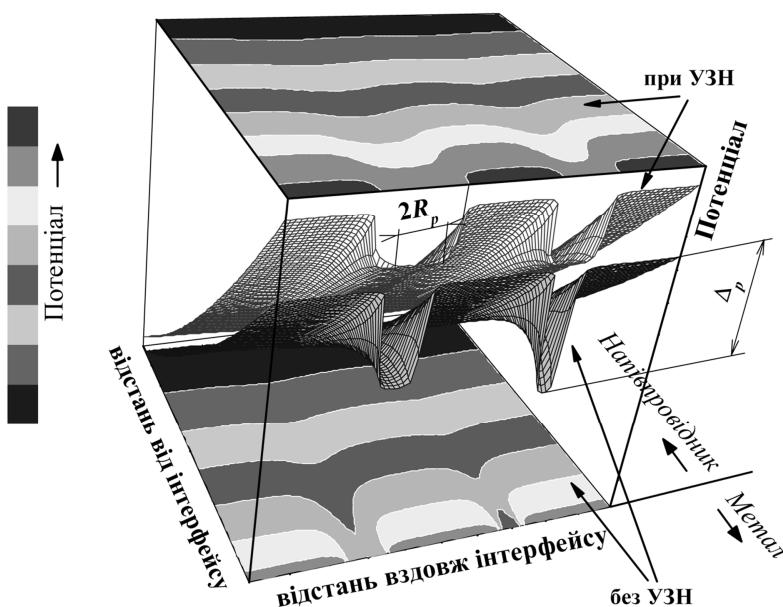
$$10^{-5} \text{ M}^{2/3} \text{ B}^{1/3}$$

2,7	2,5
-----	-----

39



Вплив УЗН на стан контакту МН



При поширенні УЗ:

- згладжування потенціалу
- збільшення ефективної густини патчів
- зростання висоти бар'єру за межами неоднорідностей

40



Механізм впливу УЗ

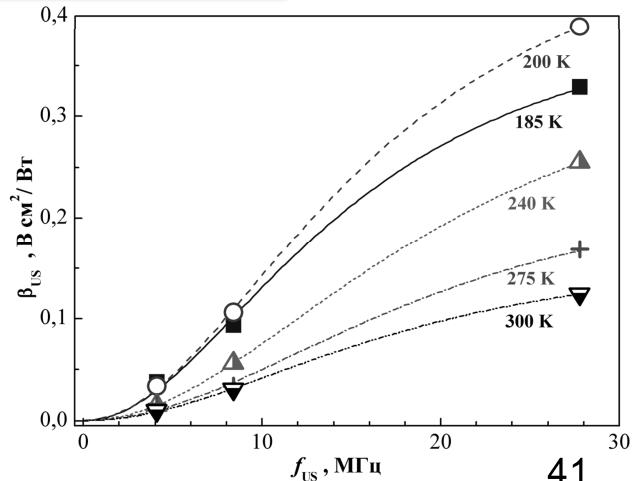
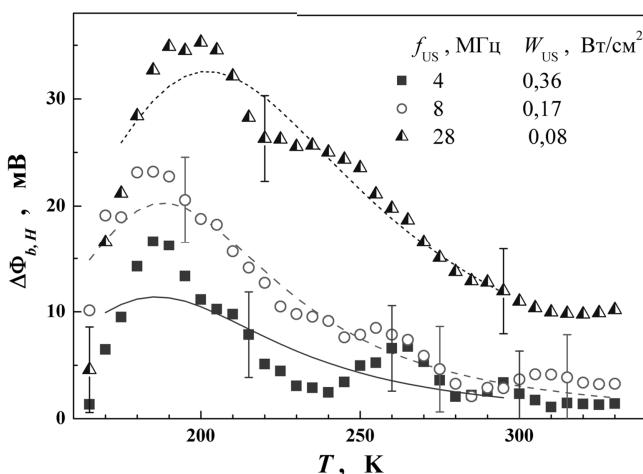
$$\Delta\Phi_{b,H}(f_{\text{US}}, T) = \beta_{\text{US}}(f_{\text{US}}, T) \cdot W_{\text{US}} \sim \frac{f_{\text{US}}}{T} \frac{(f_{\text{US}}/f_k) \exp\left(\frac{W_k}{kT}\right)}{1 + (f_{\text{US}}/f_k)^2 \exp\left(\frac{2W_k}{kT}\right)} W_{\text{US}}$$

Модель Брейсфолда, рух дислокаційних перегинів

$$D_k = D_{0k} \exp\left(-\frac{W_k}{kT}\right)$$

$$f_k = \pi D_{0k}/(20 l_0^2)$$

$$W_k = 90 \text{ мeВ}; f_k = 3 \text{ ГГц}$$



41



Зворотний струм, механізми

1) термоемісія

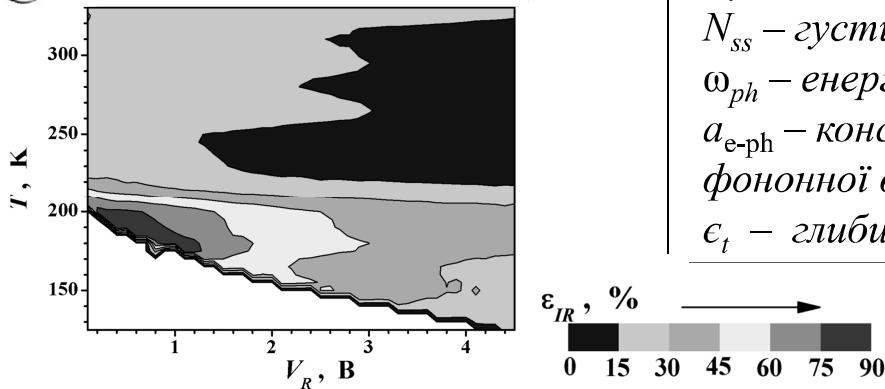
$$I_R = \frac{I_{TE} + I_{PAT}}{P_t I_0 T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{V_s}{kT}\right)\right] + \frac{P_t q^2 F_m A N_{ss}}{\sqrt{8m^* \epsilon_t}} \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_1}\right)^{1/2} \exp\left\{-\frac{4\sqrt{2m^*} \epsilon_t^{3/2} (\gamma_1 - \gamma)^2}{3qF_m \hbar} [\gamma_1 + \frac{1}{2}\gamma]\right\}}$$

$$\gamma_1 = (1 + \gamma^2)^{1/2}, \quad \gamma = \frac{a_{\text{e-ph}} \hbar \omega_{ph}^2 \sqrt{2m^*}}{qF_m \sqrt{\epsilon_t}} \left\{ \frac{\exp\left(\frac{\hbar \omega_{ph}}{kT}\right) + 1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega_{ph}}{kT}\right) - 1} \right\},$$

2) тунелювання з поверхневих станів



Al зростання

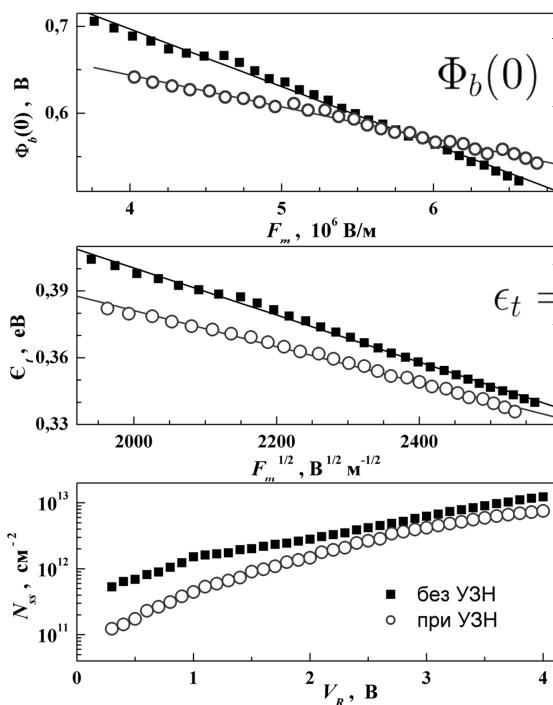


P_t – ймовірність тунелювання
 N_{ss} – густина заповнених рівнів
 ω_{ph} – енергія фонону
 $a_{\text{e-ph}}$ – константа електрон-фононної взаємодії
 ϵ_t – глибина залягання рівнів

42



AI зростання зворотного струму



$\Phi_b(0), \text{ В}$	$\Phi_{b0}(0) - \alpha_F F_m$	без УЗН	при УЗН
		$\Phi_{b0}, \text{ мВ}$	
960	790		
$\alpha_F, \text{ нМ}$			
66	36		
$\epsilon_{t0}, \text{ меВ}$			
610	520		
$\beta_F, 10^{-5} \text{ еВ} (\text{м/В})^{1/2}$			
10	7		

- підсилення емісії електронів з пасток

ПРИЧИНИ

- зміна розмірів дефектних кластерів

43

МХО



Вплив мікрохвильових обробок на дефектну підсистему SiC, GaAs, epi-GaAs

зразки

(100) GaAs : Sn $4 \cdot 10^{16}; 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$	(111) GaAs : Te $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
GaAs:Te, 6 мкм, (3,5; 3,9; 5) $\cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$	GaAs:Te, 1 мкм, $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ GaAs:Te, 2 мкм, $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

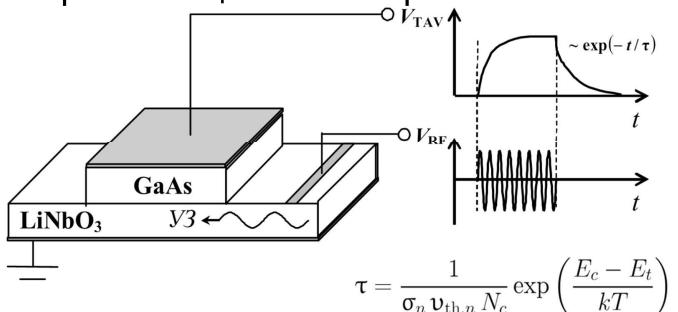
параметри МХО

$$f_{\text{MWT}} = 2,45 \text{ ГГц}; \quad t_{\text{MWT}} \leq 80 \text{ с}$$

$$W_{\text{MWT}} = 1,5 \text{ Вт/см}^2$$

методи

- ✓ акустоелектрична релаксаційна спектроскопія

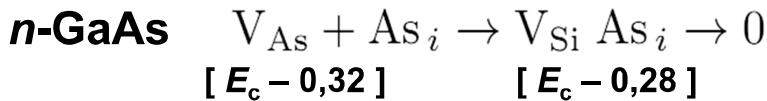
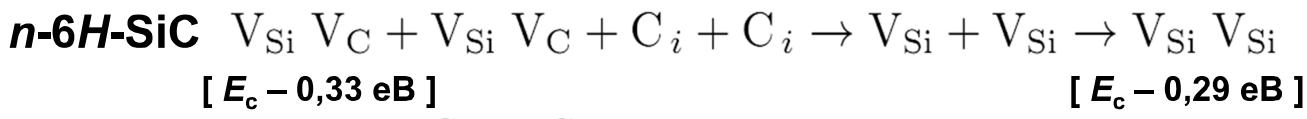


- ✓ профілометрія
- ✓ визначення деформації приповерхневих площин
- ✓ рентгенівська топографія

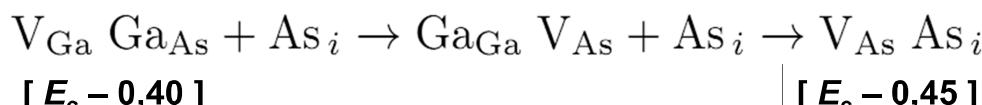
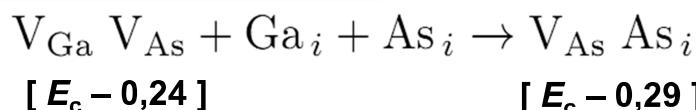
44



Перетворення дефектів МОНОКРИСТАЛИ



ЕПІТАКСІЙНІ СТРУКТУРИ GaAs



45

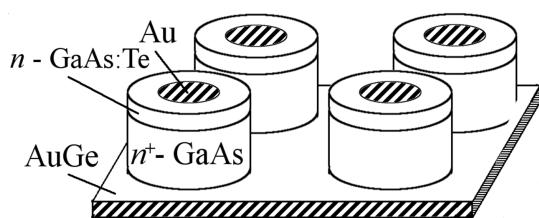
Au/n-GaAs + YZO



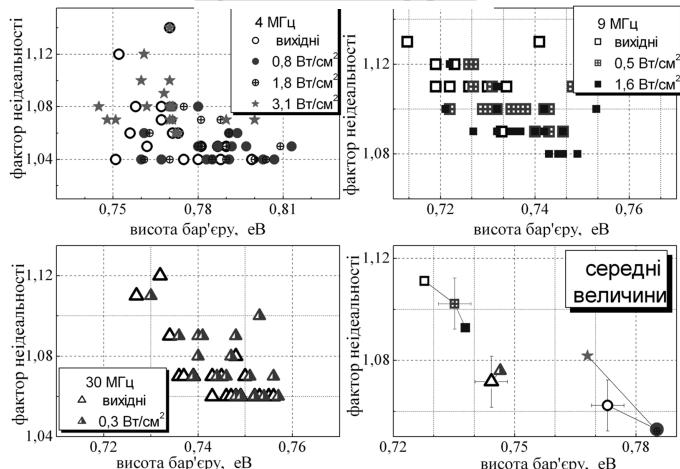
Ультразвукова обробка Au–TiBx–n–n+–GaAs

$f_{US} = 4 - 30$ МГц; $t_{UST} \leq 15$ год

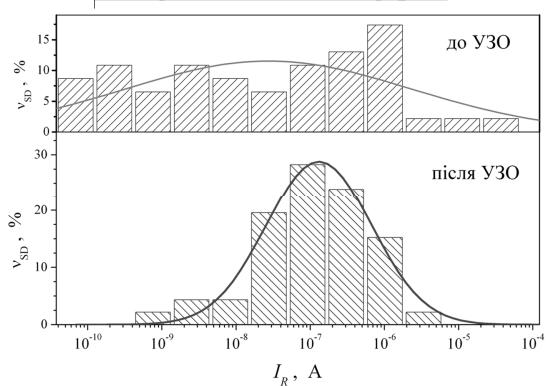
$W_{US} \leq 3.1$ Вт/см²; $T = 300$ К



прямий струм



зворотний струм



протилежний вплив на тунельну та термоемісійну складові струму

- сгладжування неоднорідностей потенціального рельєфу контакту

- збільшення концентрації домішок у приконтактній області

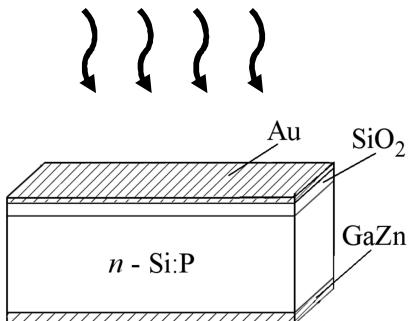
46



Акустовідпал γ-опромінених структур Si-SiO₂-Au

γ-кванти ⁶⁰Co

$D = 5 \cdot 10^7$ рад



УЗО:

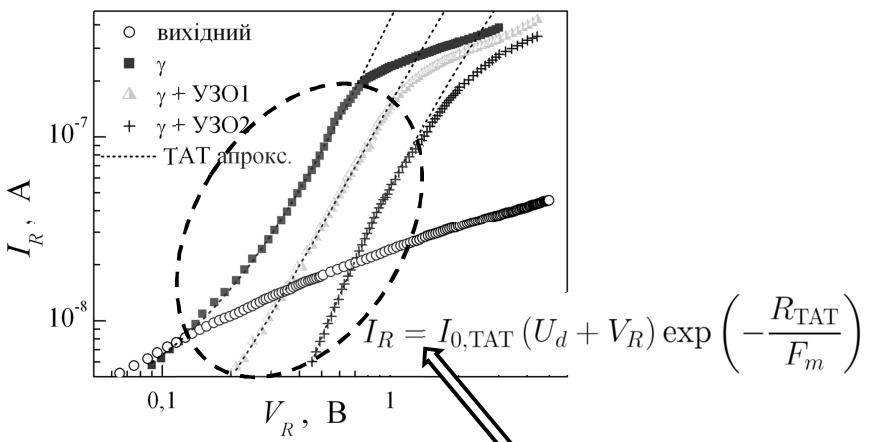
$f_{\text{US}} = 4$ МГц

$W_{\text{US}} = 2$ Вт/см²

$t_{\text{UST}} = 30 \div 60$ хв

$T = 350$ К

зворотний струм



γ-кванти → поява ТАТ струму внаслідок утворення E' -центрів (вакансії кисню в SiO_2)

УЗО → відпал радіаційних дефектів внаслідок акустоіндукованої дифузії атомів кисню

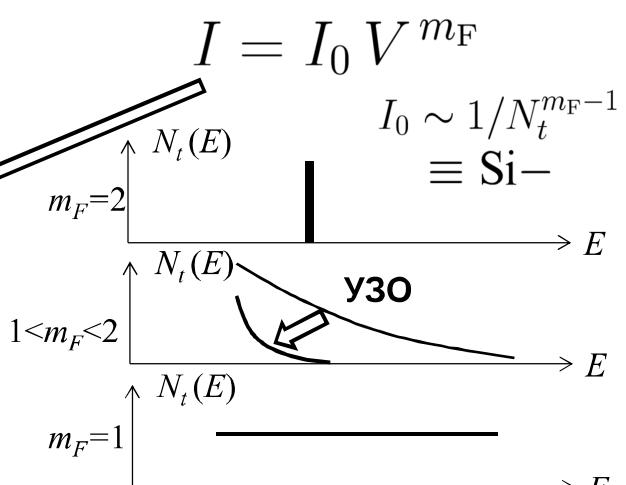
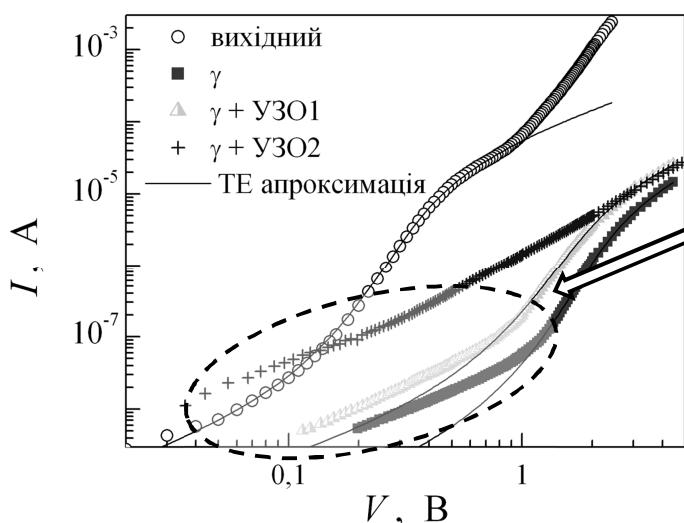
47



Акустовідпал γ-опромінених структур Si-SiO₂-Au

прямий струм

γ-кванти → поява SCLC струму, пов'язаного з P_b -центраторами ($\equiv \text{Si}-$)



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 → відпал внаслідок пасивації ненасичених зв'язків атомами Н, звуження енергетичного спектру пасток

48



Висновки

✓ Виявлено оборотна акустоіндукована деградація кремнієвих сонячних елементів, як вихідних, так і опромінених нейtronами або у-квантами.

Запропоновано модель акустоактивного комплексного дефекту.

Встановлено, що акусто-активними дефектами є кисневмісні преципітати, дивакансії та пари вакансія-кисень.

✓ Проведено порівняльний аналіз та тестування 16 основних відомих методів визначення параметрів діодів Шотткі з вольт-амперних характеристик.

Запропоновано адаптивну процедуру для оптимізації аналітичних методів.

Встановлено, що найбільш ефективними методами є еволюційні та метод Gromov з адаптивною процедурою.

✓ Встановлено, що структурах Al-n-n⁺-Si-Al перенесення заряду відбувається внаслідок термоемісії через неоднорідний контакт. 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 процесів тунелювання. Встановлено взаємозв'язок характеру дозової немонотонності зміни висоти бар'єру та ступеню неоднорідності контакту.

49



Висновки

✓ Виявлено оборотні 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 дефектних кластерів та (в опромінених структурах) перетворення радіаційних дефектів.

✓ Встановлено, що причинами перетворень, викликаних мікрохвильовим випроміненням у підсистемі дефектів 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 Шотткі, створених в єдиному технологічному процесі, та звуження енергетичного спектра радіаційноіндукованих пасток на інтерфейсі системи Si-SiO₂.

50