



**КИЇВСЬКИЙ 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



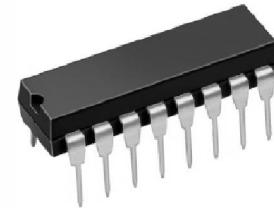
Мета

- 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 напівпровідниковах поверхнево-бар'єрних структурах



Актуальність

- Матеріал – основа мікроелектроніки та сонячної енергетики
- Встановлення фізичних механізмів впливу зовнішніх факторів на експлуатаційні характеристики
- Розробка нових методів керування властивостя 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





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.

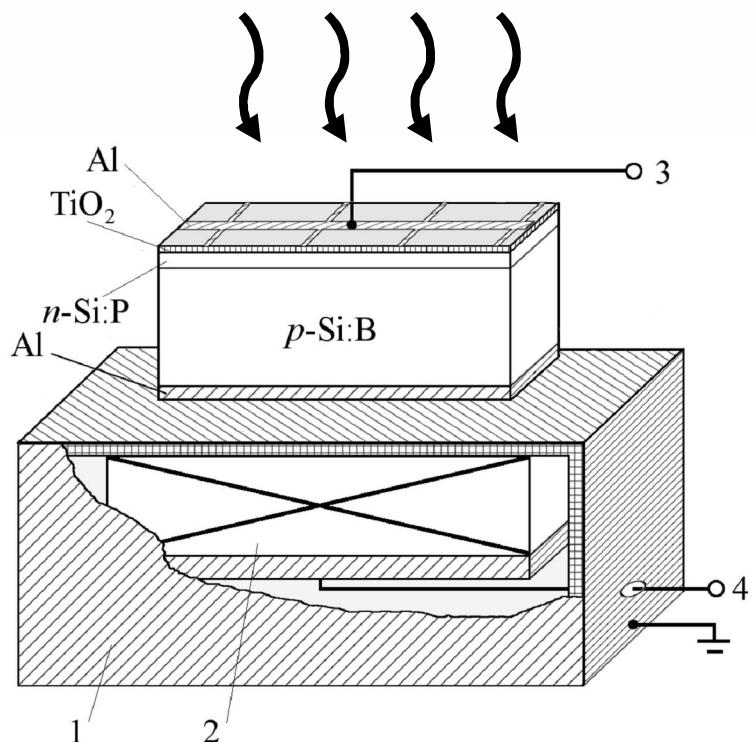


Наукова новизна

- Виявлено оберні 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

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

$\lambda = 900$ нм,
 $W_{ph} = 8$ Вт/м²



УЗН:

хвилі: повздовжні, поперечні;
 $f_{us} = 4 - 26$ МГц; $W_{us} < 0.5$ Вт/см²

$T = 290 - 330$ К

Опромінення:

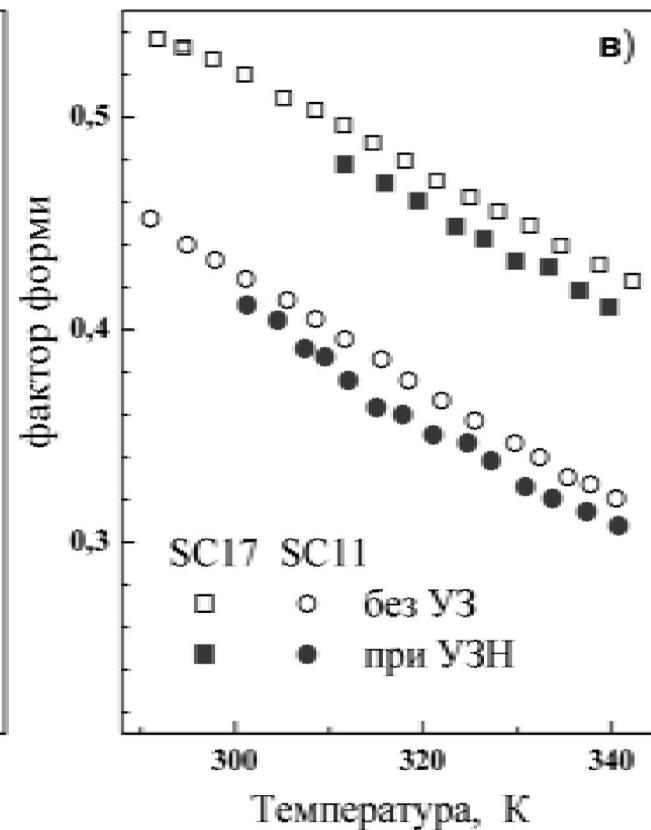
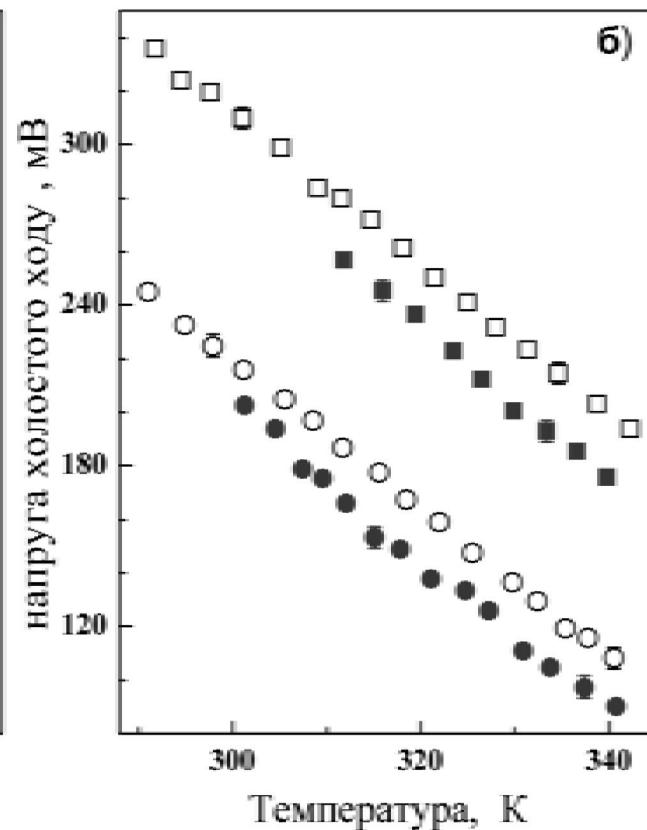
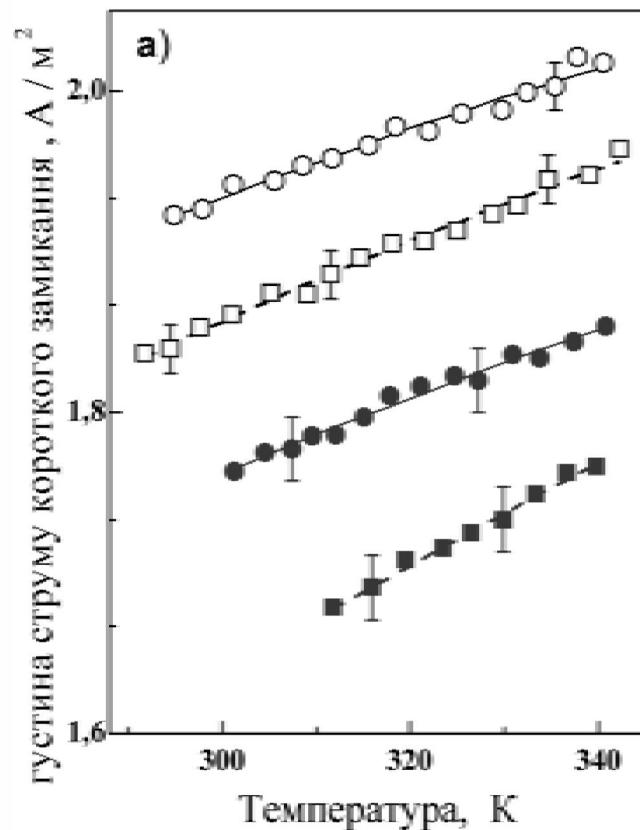
реакторні нейтрони $4 \cdot 10^{11}$ см⁻²
 γ -кванти ^{60}Co 10^6 та 10^7 рад

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



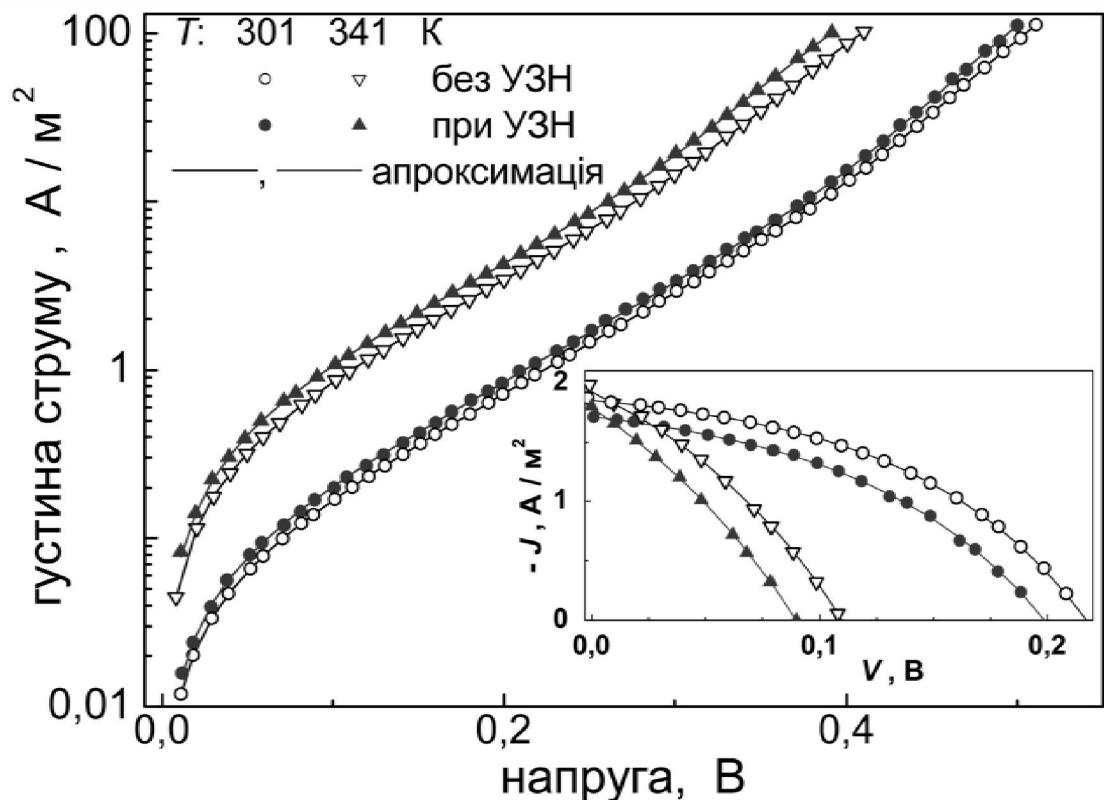
відомо: **LID** (світло) **PID** (напруга) **RID** (радіація)

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





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

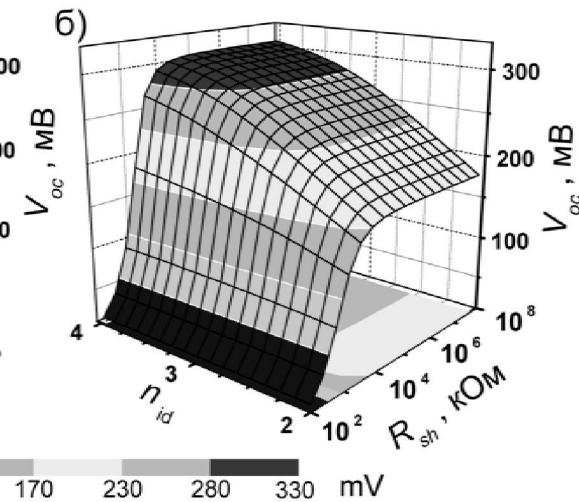
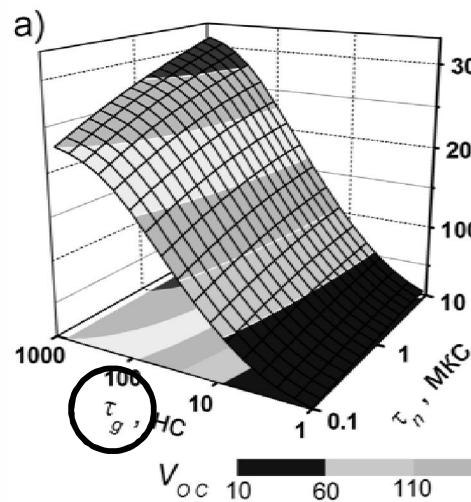


апроксимація

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



Чисельний розрахунок V_{oc} та FF



$$n_{id} = 2.55$$

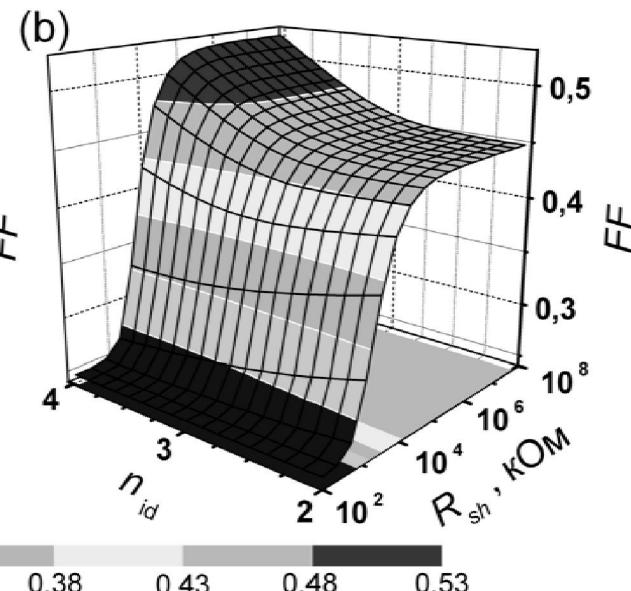
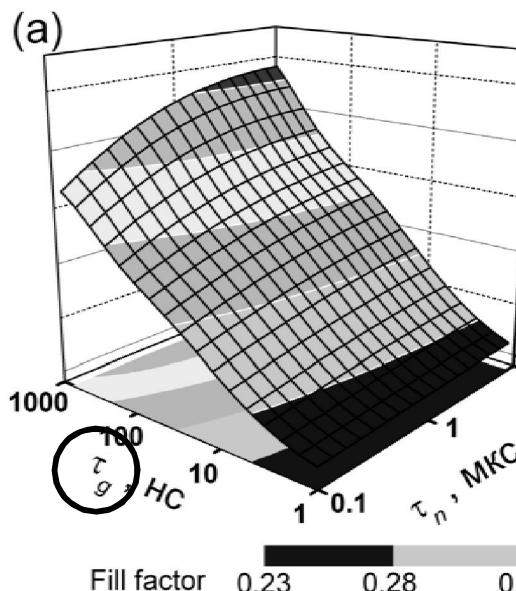
$$\tau_n = 3 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$R_{sh} = 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

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

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

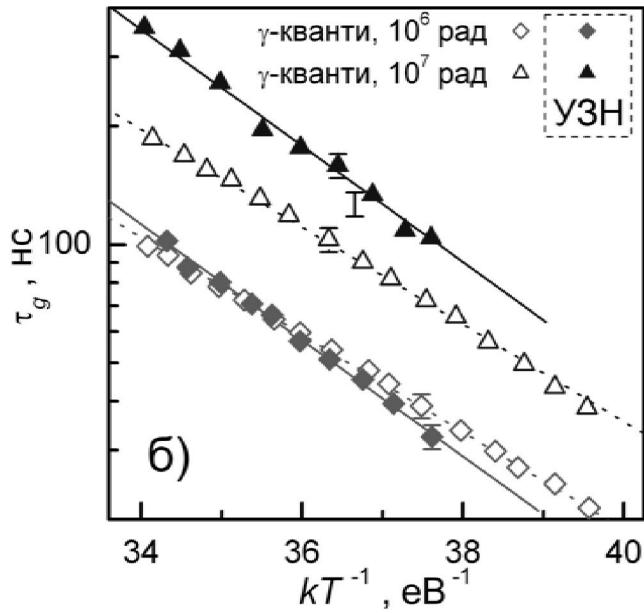
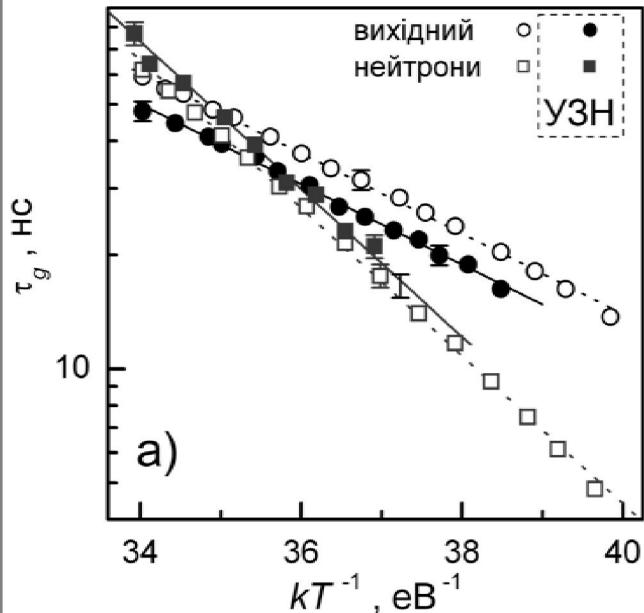
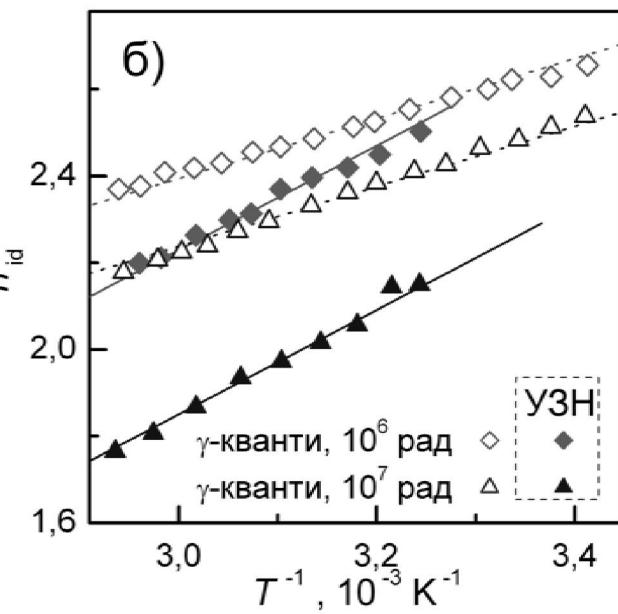
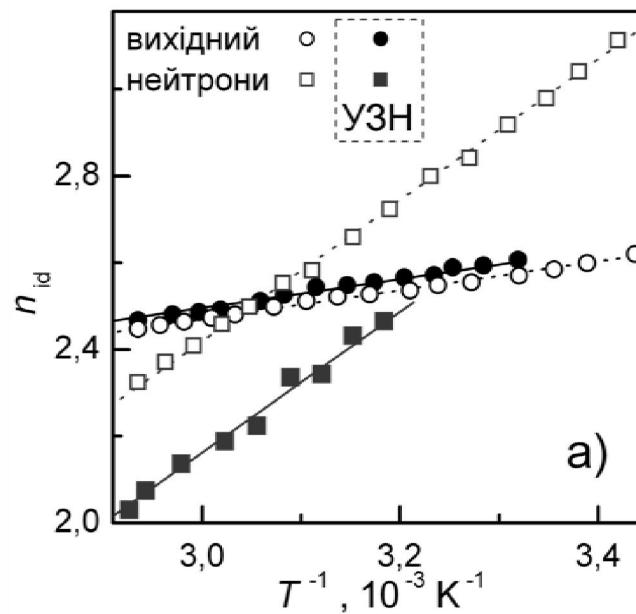
$$L_n = \sqrt{\mu_n kT / (\tau_n q)}$$





Область просторового заряду, РД

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

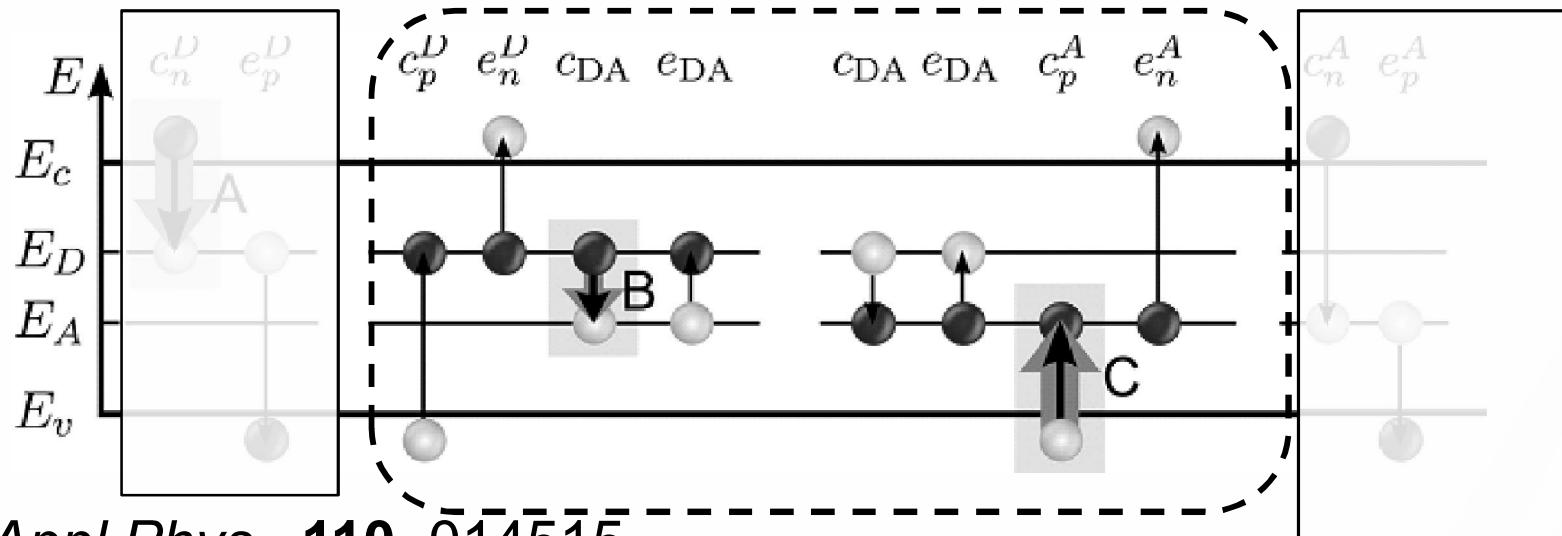


$$\tau_g(T) = \tau_{g0} \exp\left(-\frac{E_{\tau g}}{kT}\right)$$



Область просторового заряду

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



J.Appl.Phys., 110, 014515

темпер
рекомбінації:

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

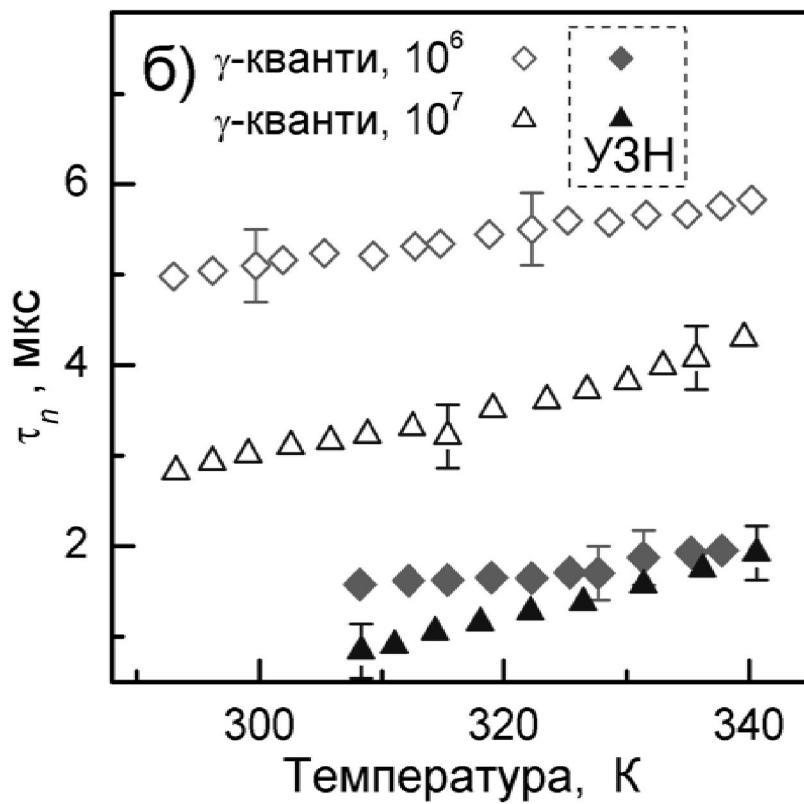
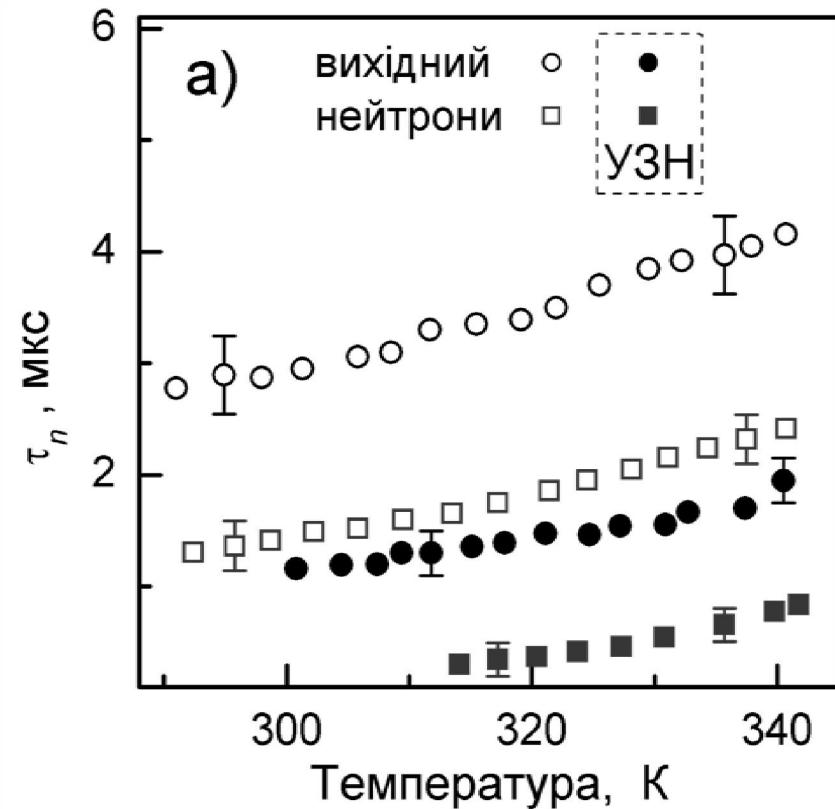
параметр зв'язку

$$R_{12} = \frac{(n + n_D)(p + p_A)}{R_{DA}} + \tau_n^D(p + p_D) + \tau_p^A(n + n_A),$$

$$\tau_n^D = (N_D \sigma_n^D \nu_{th,n})^{-1}, \quad \tau_p^A = (N_A \sigma_p^A \nu_{th,p})^{-1},$$



Квазі-нейтральна область



рекомбінація Шоклі-Ріда-Хопа

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

експеримент:

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

амплітуда зміщення атомів
при поширенні УЗ



Модель акустоактивного комплексного дефекту

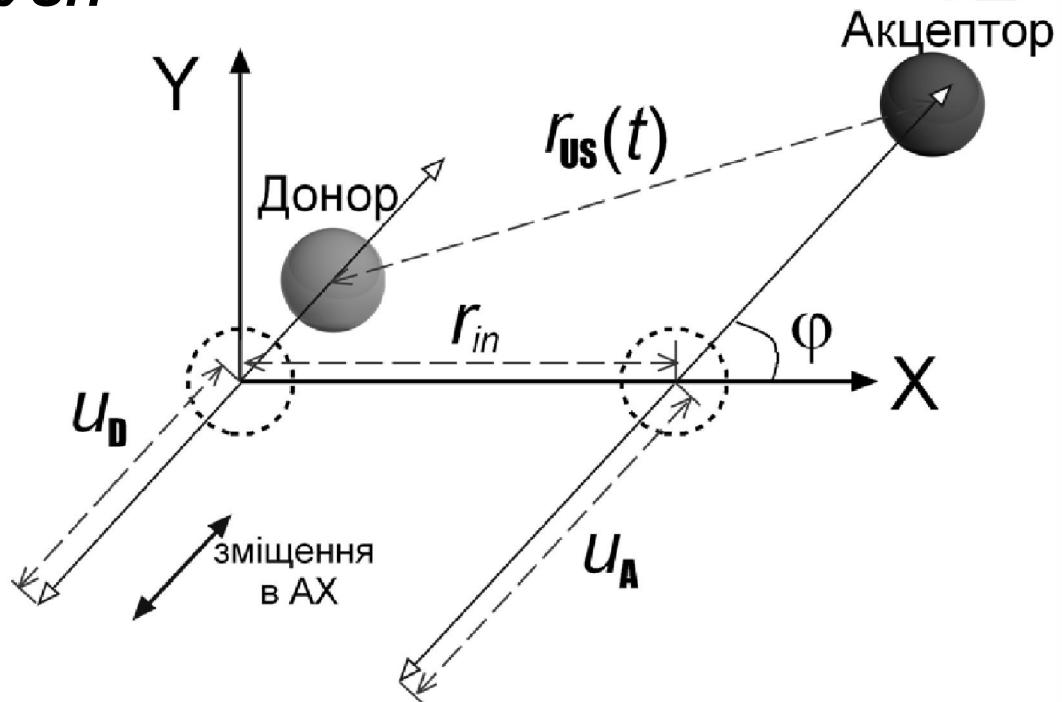
сила на точковий дефект під час УЗН

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

χ – об’ємний модуль пружності

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

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



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



Модель акустоактивного комплексного дефекту

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

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

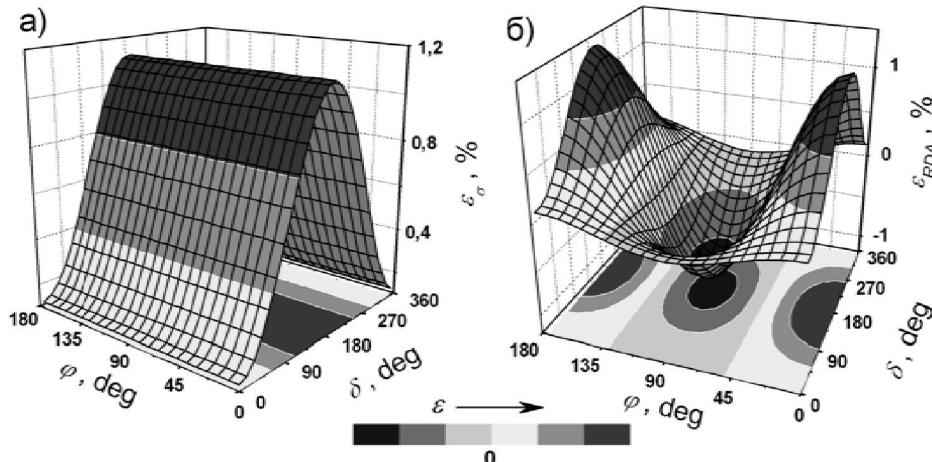
$$\varepsilon_{\sigma} = \frac{(u_D \pm u_A)^2}{2 r_{in}^2} = K_{\text{US}}^{\text{DA}} u_{\text{US}}^2$$

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

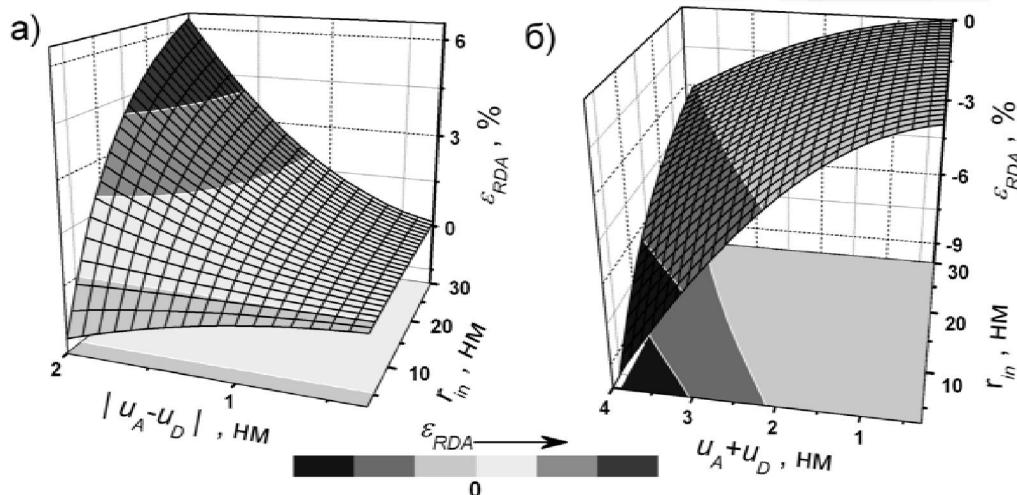
“-” при $(\Delta\Omega_d^{\text{D}} \cdot \Delta\Omega_d^{\text{A}}) > 0$

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

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



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



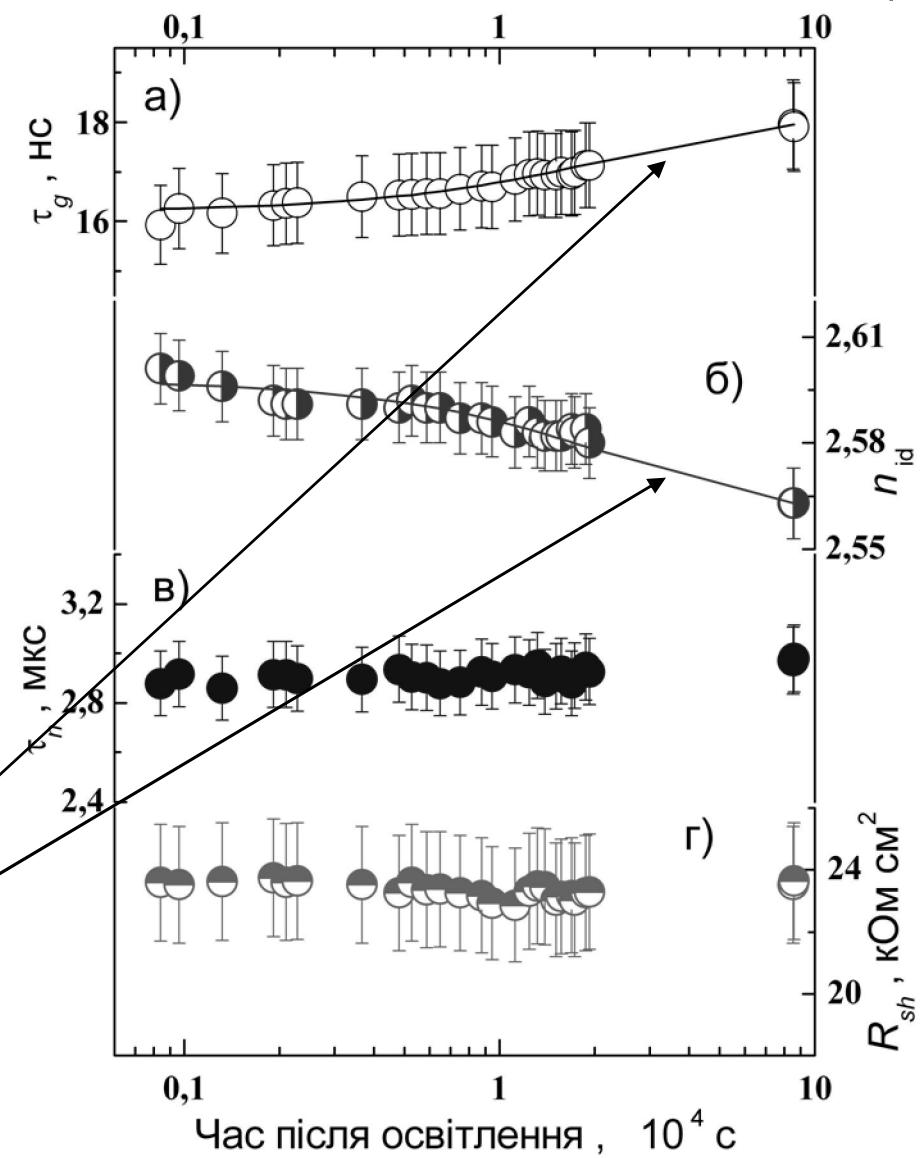


Оцінка дефектного складу

- 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

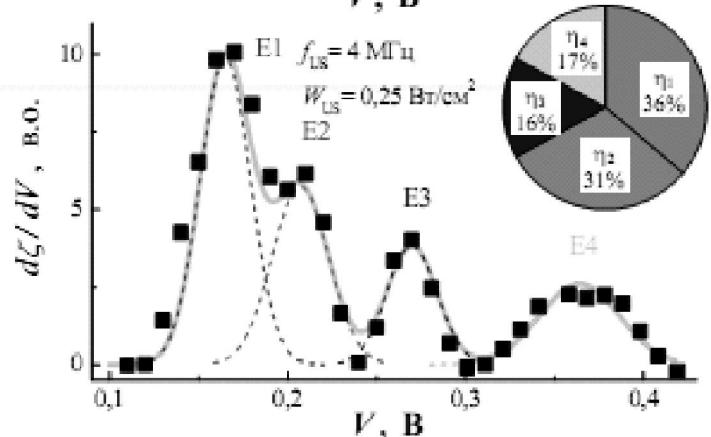
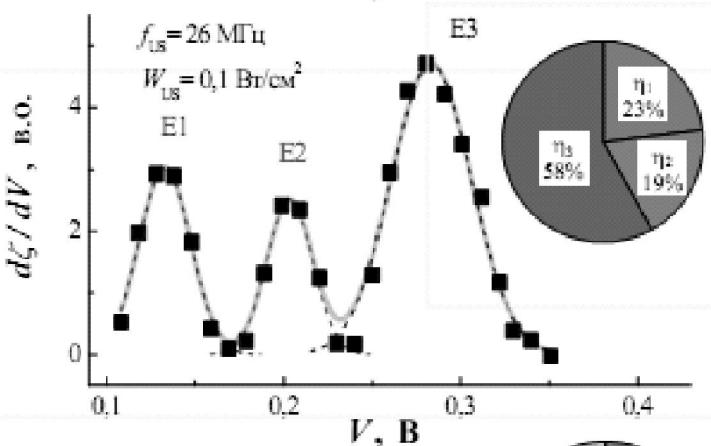
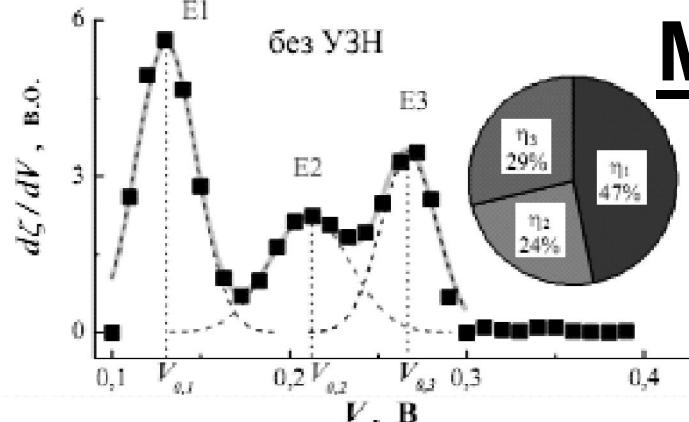
$$N_{Fe}(t) = (N_{Fe,0} - N_{Fe,eq}) \exp\left[-\frac{t}{\tau_{rep}}\right] + N_{Fe,eq}$$

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





Оцінка дефектного складу Метод диференційних коеф. ВАХ



Виявлено рівні:

- **кисневмісні преципітати (КП)**

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

- **дислокації** $E_c - 0,36$ еВ

- **комплекси Fe_iO_i** $E_c - 0,43$ еВ

При УЗН:

- ❖ **незначне (~ 0.01 еВ) 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**

$$E_v + 0.22 \text{ eV} \quad \sigma_n/\sigma_p = 157$$

$$E_c - 0.08 \text{ eV} \quad \sigma_p/\sigma_n = 1200$$

CDLR процес

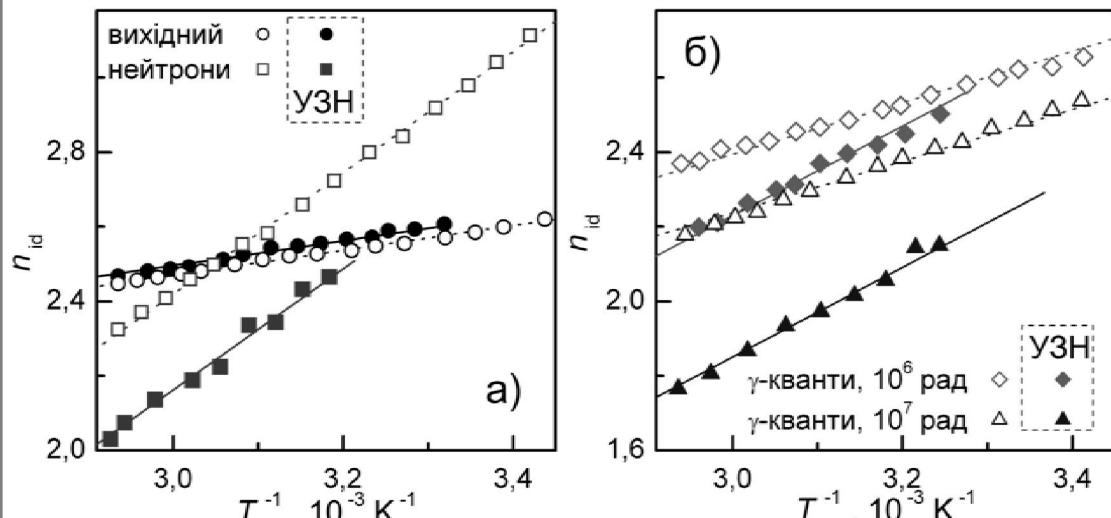
ОПРОМІНЕННЯ:

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 |



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

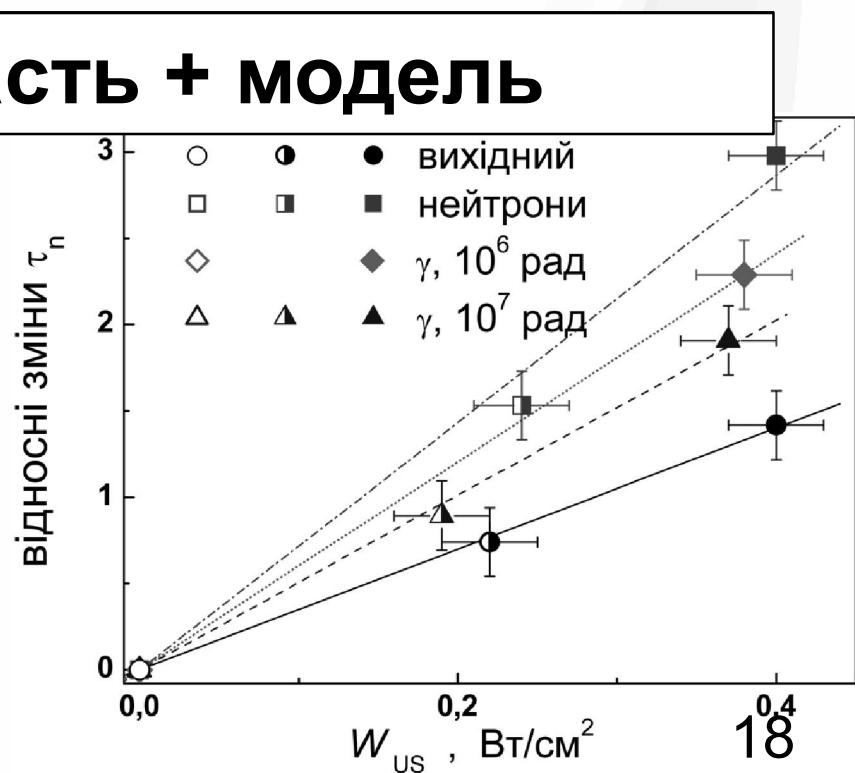
визначено коефіцієнти акусто-дефектної взаємодії

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

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

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

**Дивакансія – акустоактивний дефект,
 C_iO_i – ні**





Шунтуючий опір

причини:

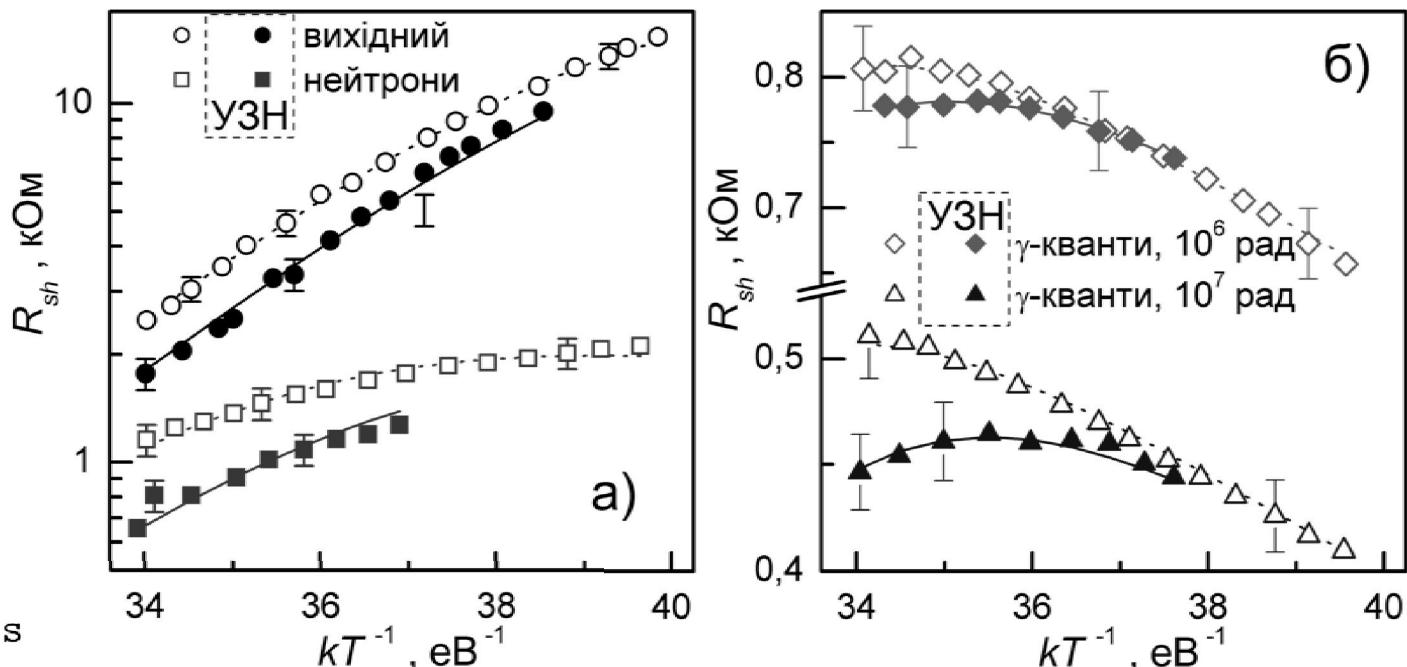
- часточки Al
- дислокациї

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

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

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

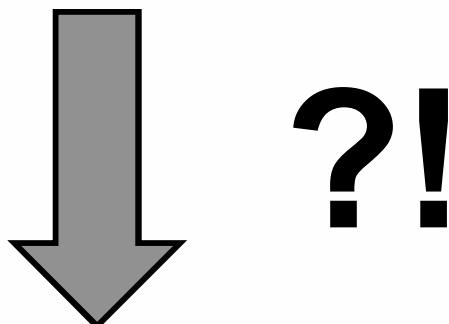
$$\sigma_{dis} = \rho_{dis} A q^2 A_{dis} \sqrt{K_n K_p} N_{dis} (n_p + p_p) / k$$



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

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУР МЕТАЛ–НАПІВПРОВІДНИК

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



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



Методи

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

2

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

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

4

ї сім'ї



Об'єкти

вольт-амперні характеристики (130÷330 К)

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



Оптимізація

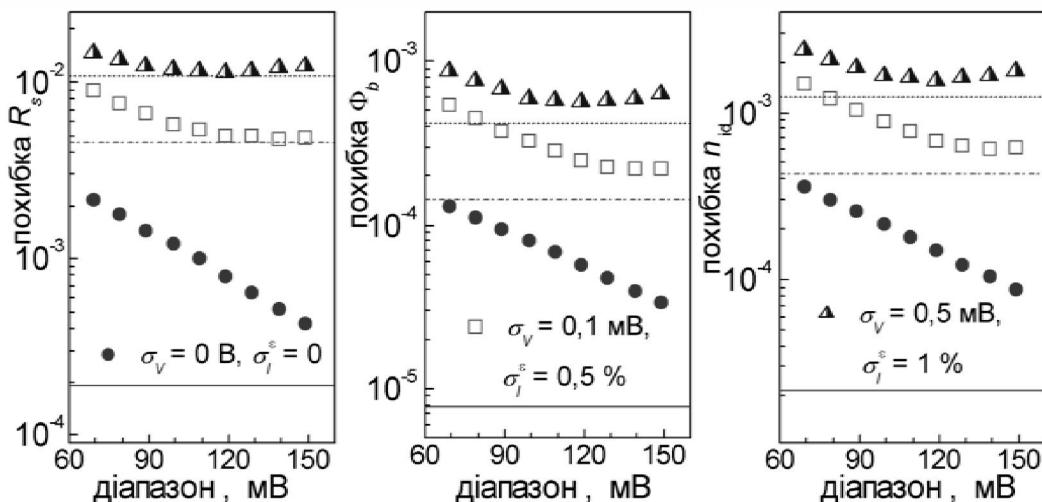
✓ визначено оптимальні значення параметрів (методи Norde, Bohlin)

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)



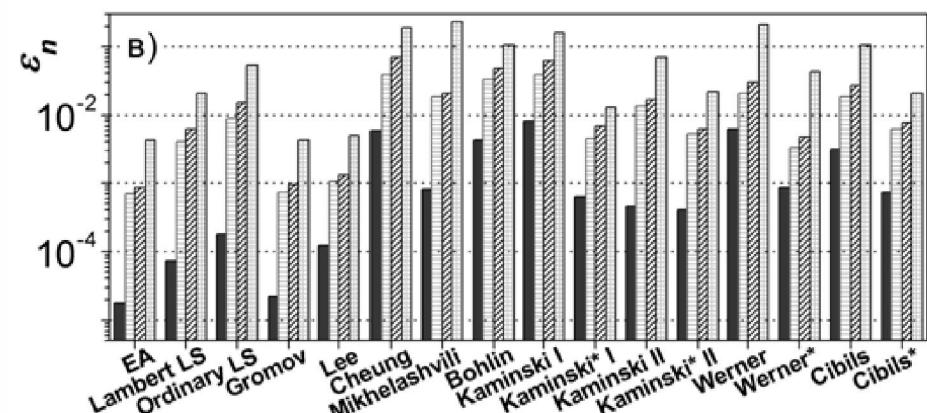
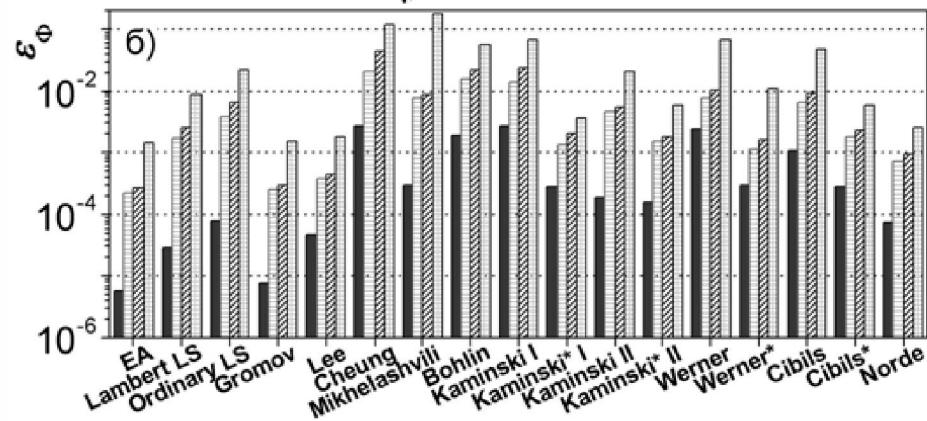
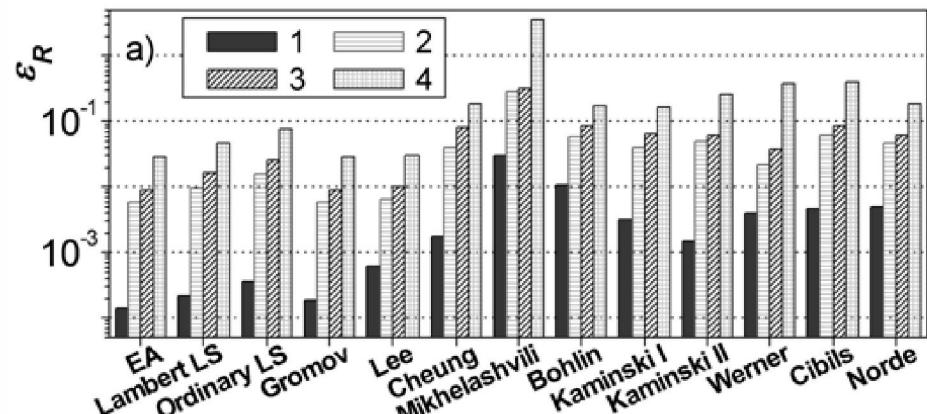
лінії – з використанням процедури

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

✓ проведено визначення необхідної кількості поколінь для збіжності еволюційних алгоритмів



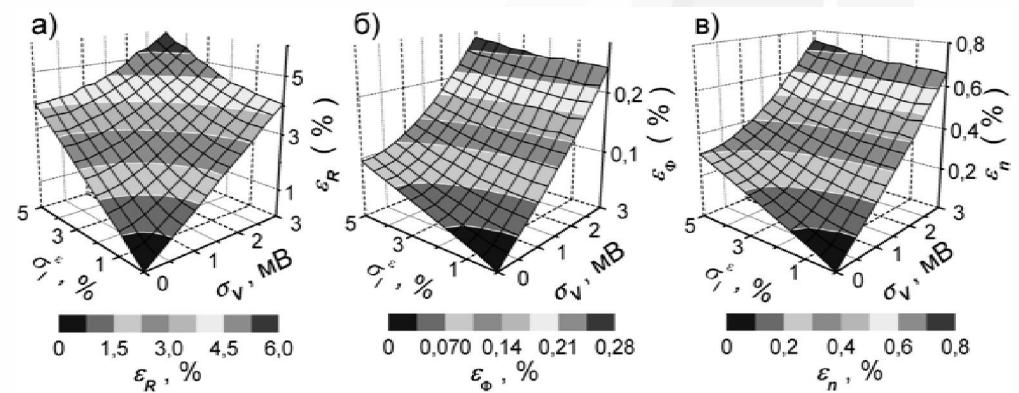
Визначено вплив похибок вимірювань



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

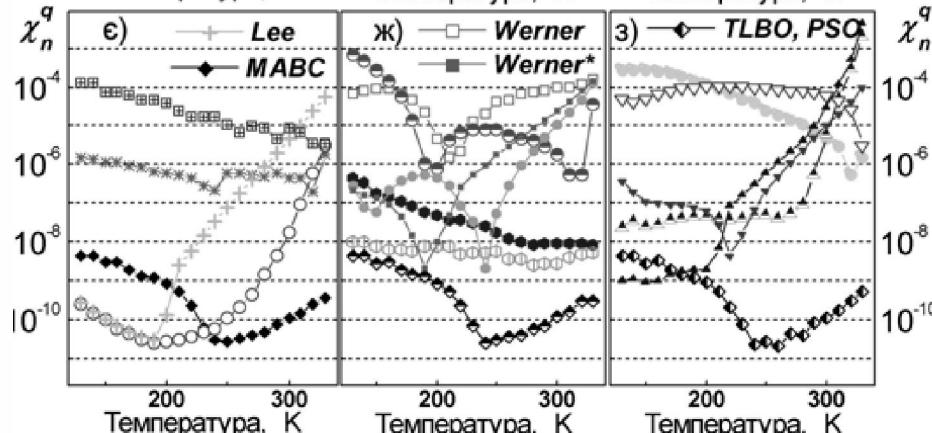
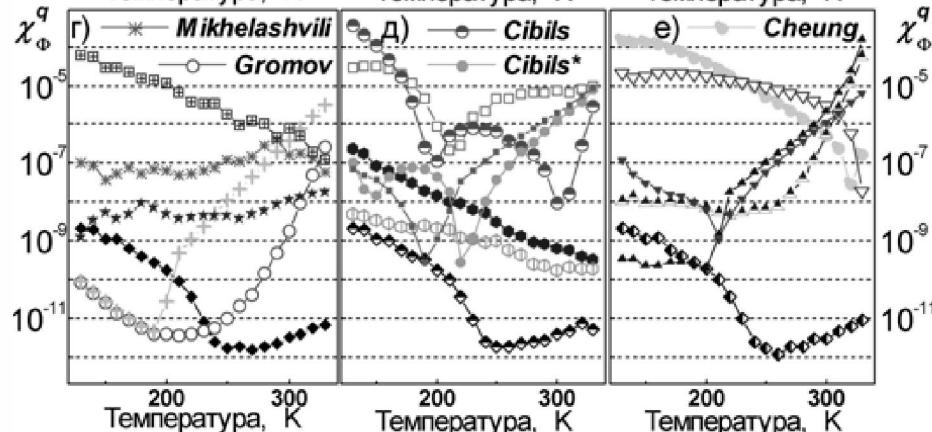
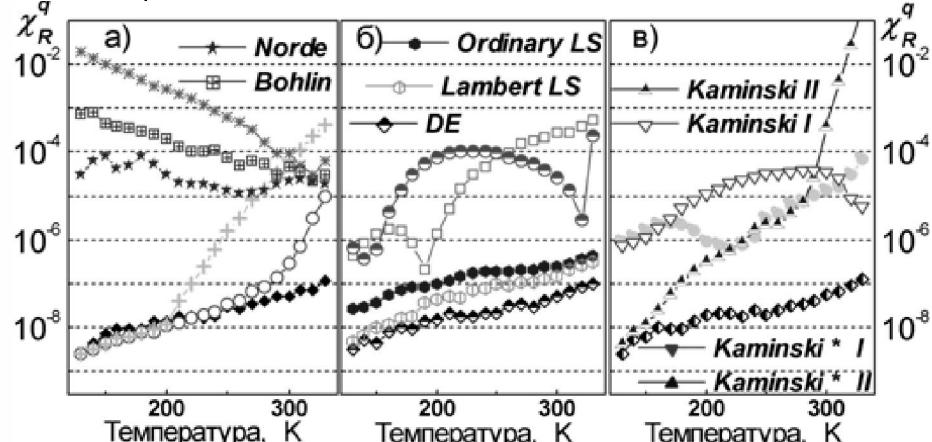
σ_V , мВ: 0 (1), 0,3 (2, 3), 2 (4).

σ_ϵ^e , %: 0 (1), 0,5 (2), 1 (3, 4).





Порівняння точності та швидкодії

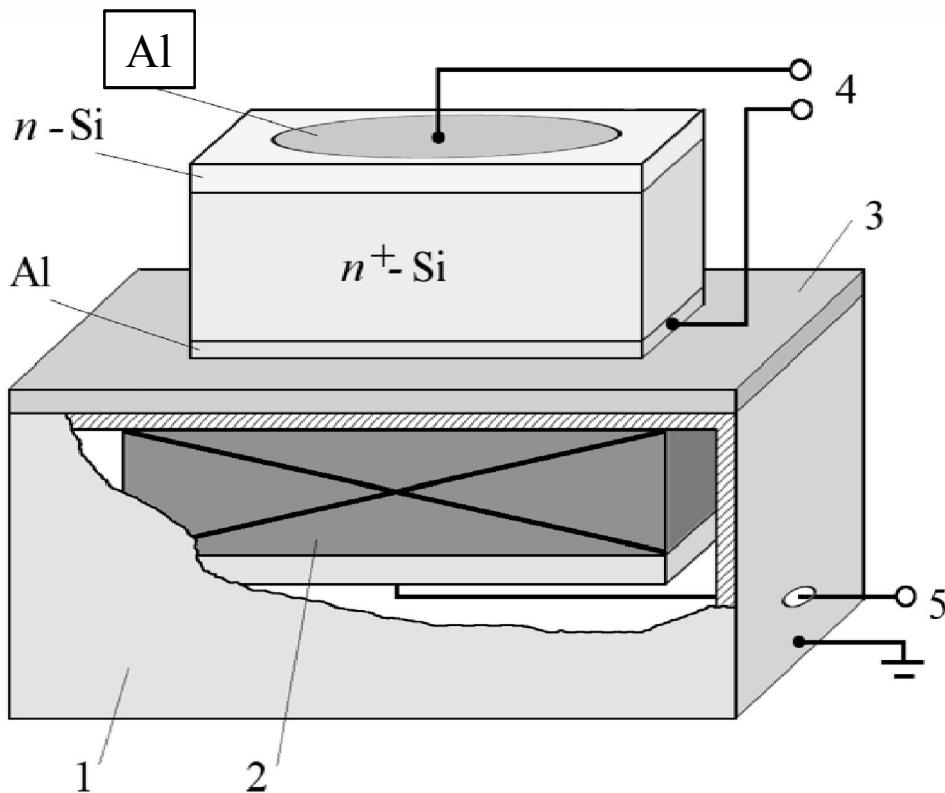


| Метод | Час роботи, с | Метод | Час роботи, с |
|--------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|
| Norde | $(2,6 \div 3,7) \cdot 10^{-5}$ | Werner | $(4,0 \div 4,5) \cdot 10^{-5}$ |
| Cibils | $(0,2 \div 5,3) \cdot 10^{-3}$ | Kaminskii I | $(4,5 \div 8,0) \cdot 10^{-5}$ |
| 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

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



BAX:
 $T = 120 - 330$ K

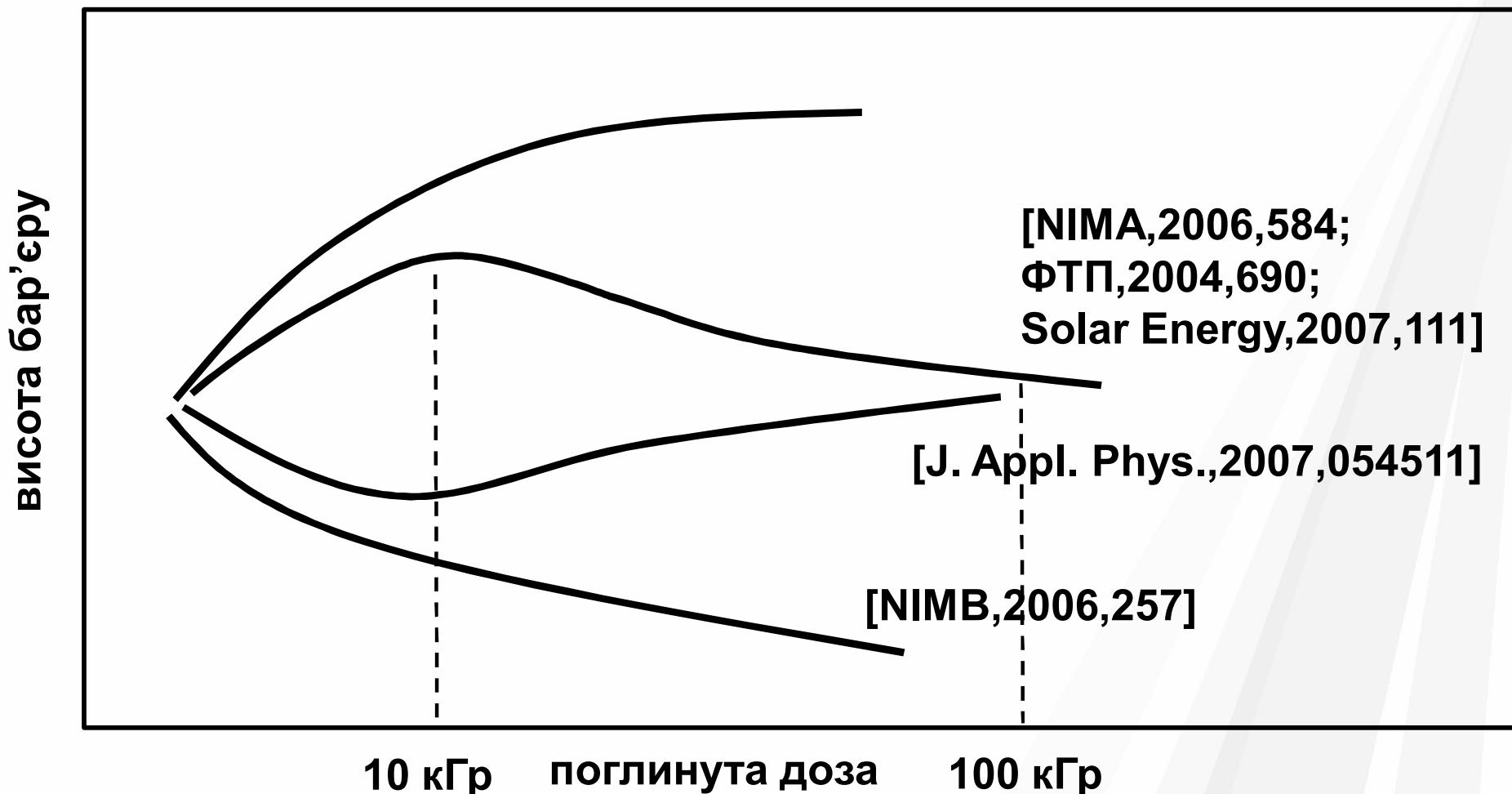
Опромінення:
 γ -кванти ^{60}Co ,
10 кГр та 100 кГр

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



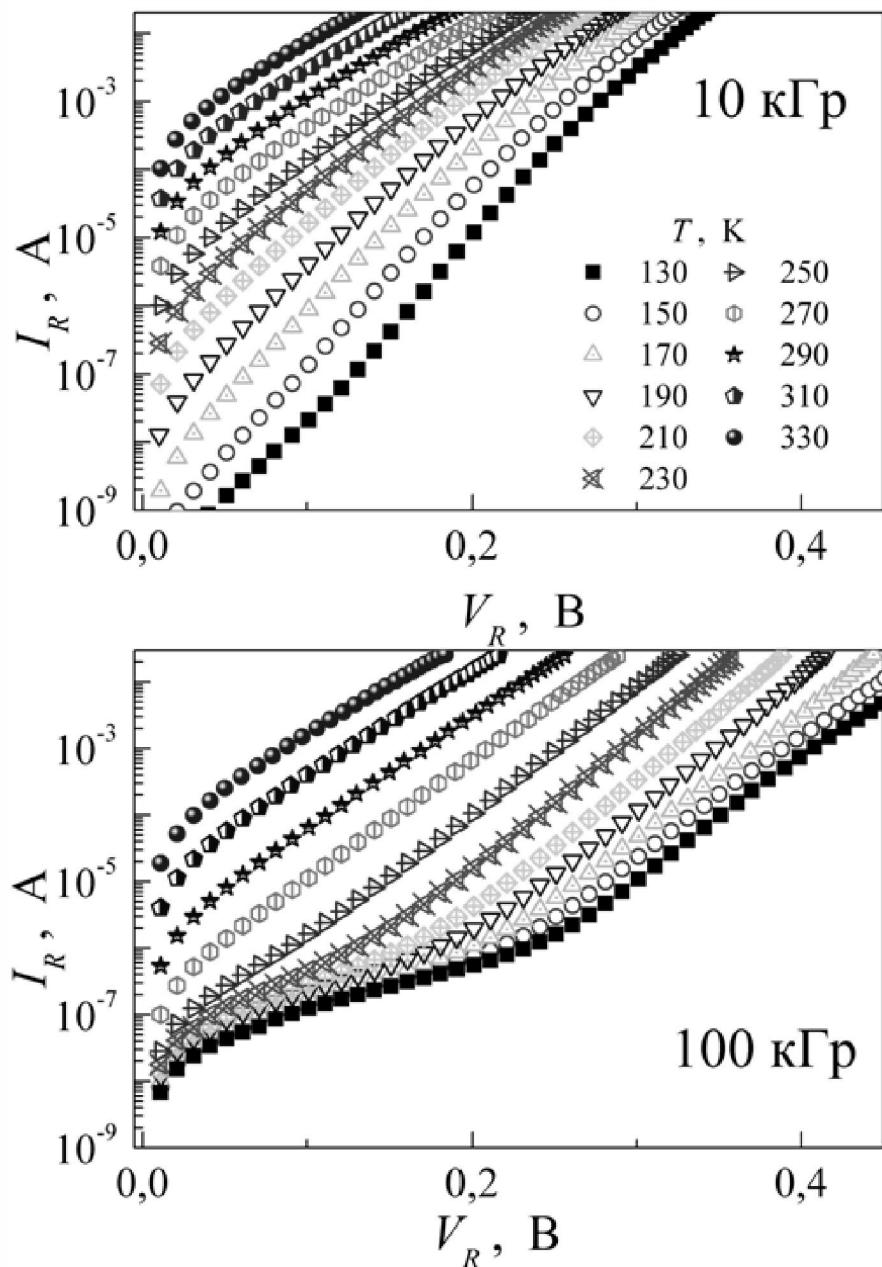
Радіаційні зміни висоти бар'єра

характер немонотонності ??!!

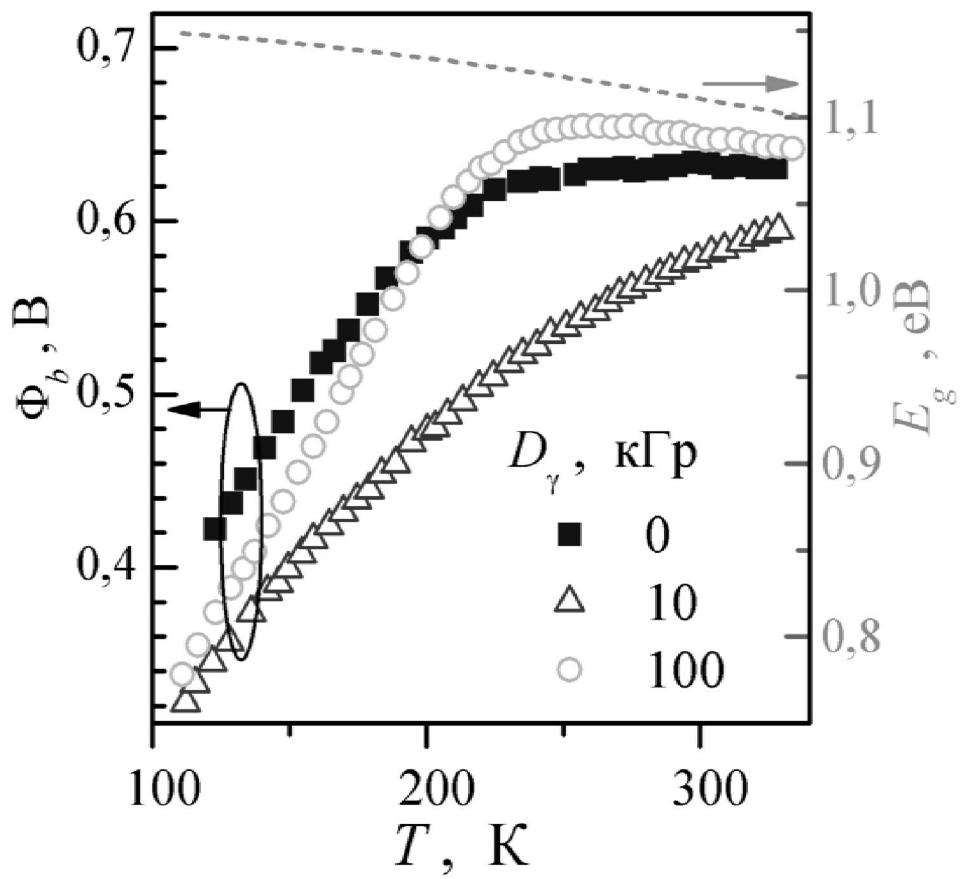




Опромінені, прямі гілки ВАХ



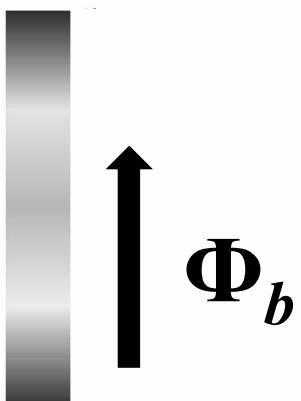
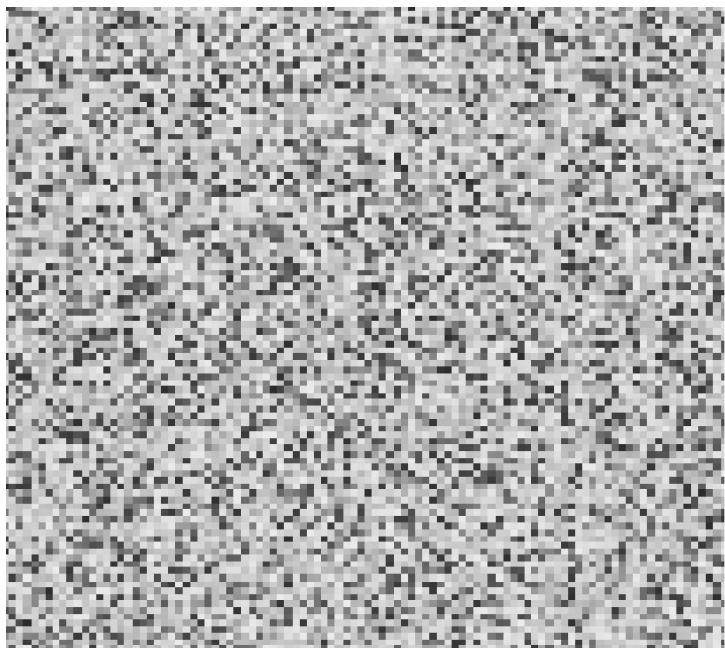
$$I = I_1 + I_2 = I_{s1} \exp\left(\frac{qV}{n_{id,1}kT}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] + \\ + I_{s2} \exp\left(\frac{q(V - IR_S)}{n_{id,2}kT}\right) \cdot \left\{1 - \exp\left[-\frac{q(V - IR_S)}{kT}\right]\right\},$$



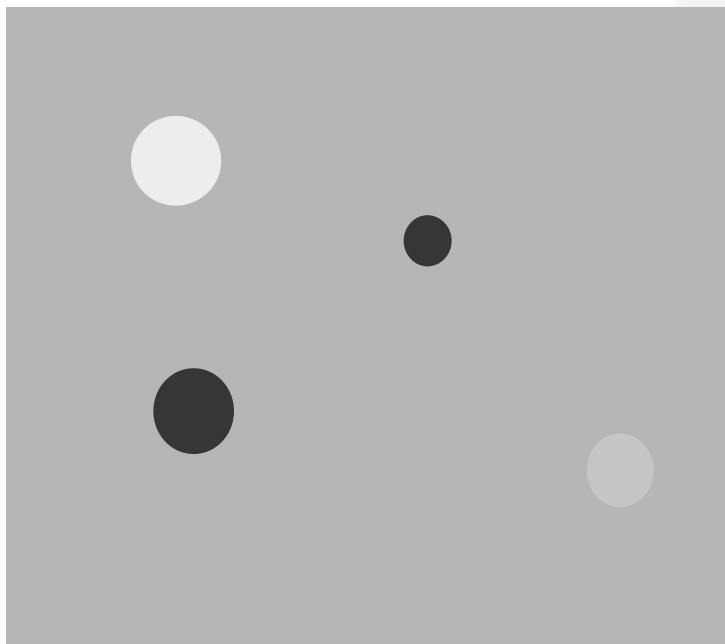


Моделі неоднорідного контакту

розподіл Гауса для Φ_b



однорідний бар'єр з
окремими патчами



Φ_b^0 – середнє значення
 σ_Φ – стандартне відхилення

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

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

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



Прямий струм

Доза, кГр



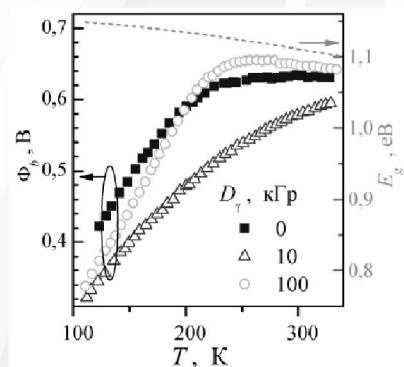
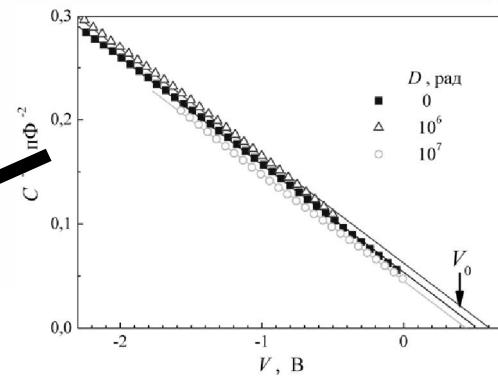
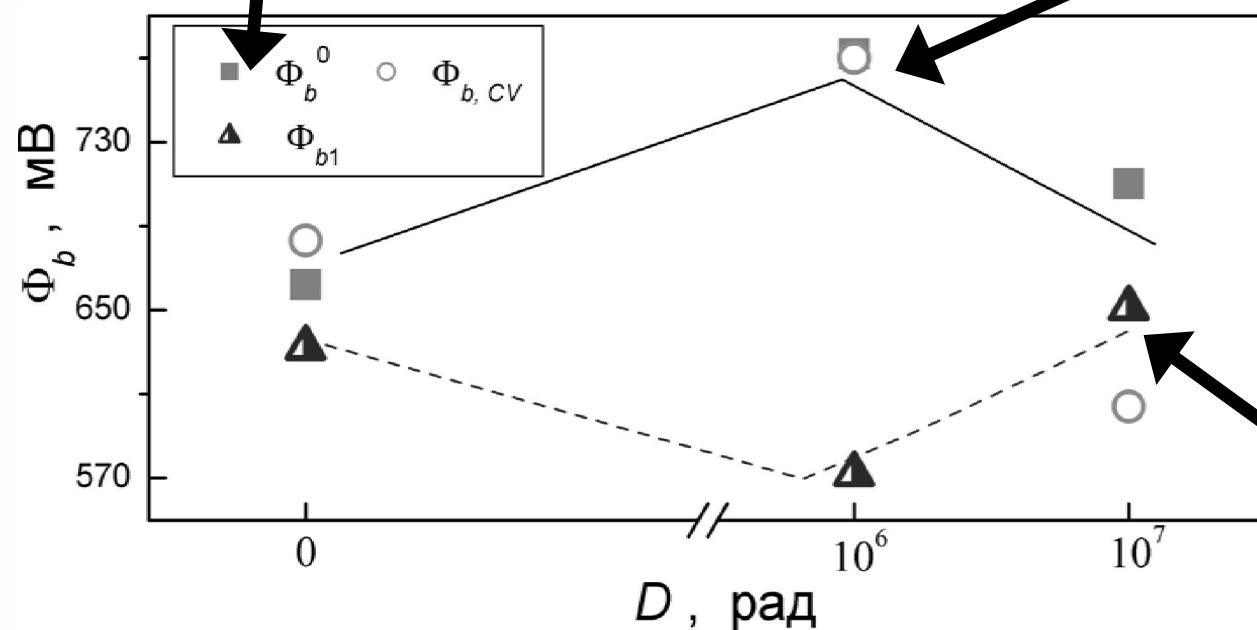
Температура, К
29



характер немонотонності ⇔ ступінь неоднорідності

Прямий струм

Доза, кГр

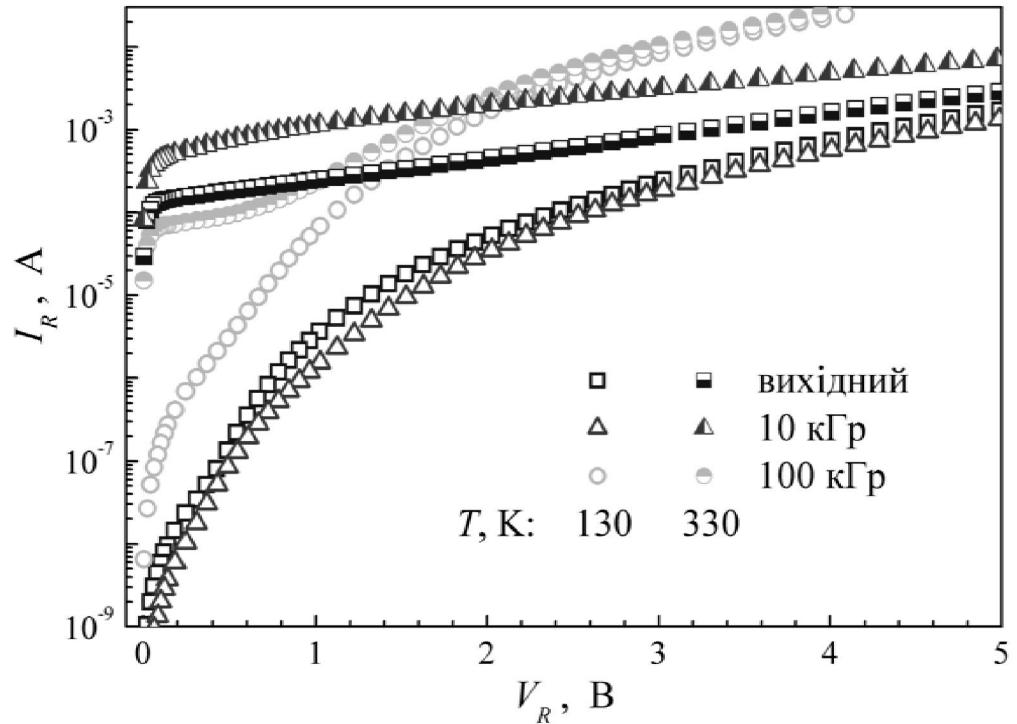




Зворотний струм до опромінення

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

після опромінення

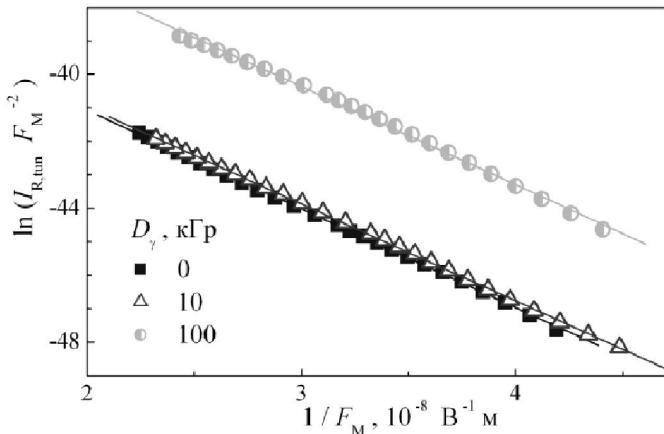




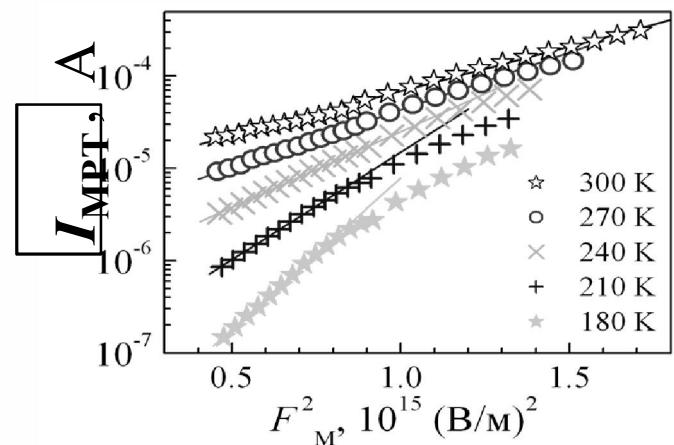
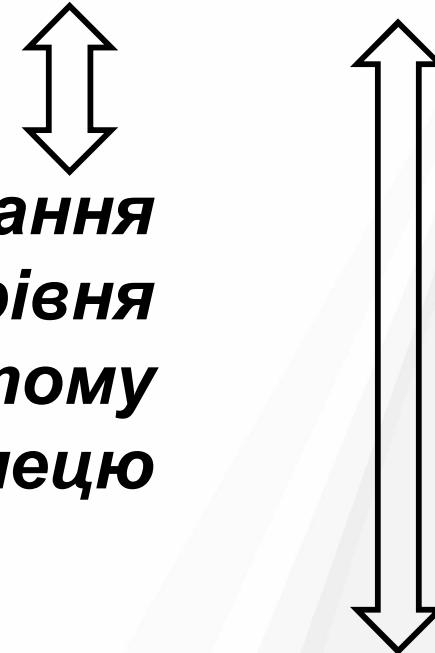
Зворотний струм

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

термоелектронна емісія



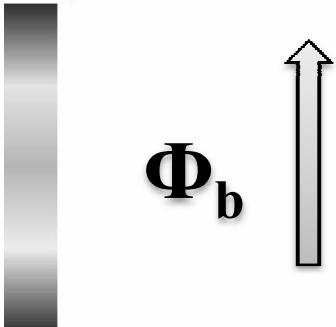
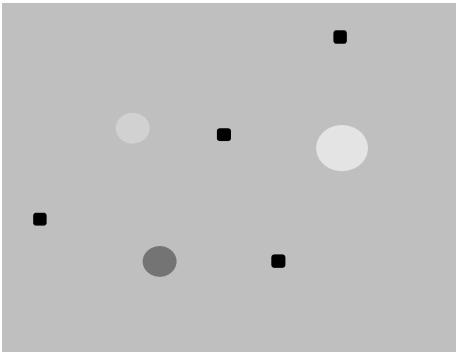
**пряме тунелювання
за участю рівня
міжвузлового атому
вуглецю**



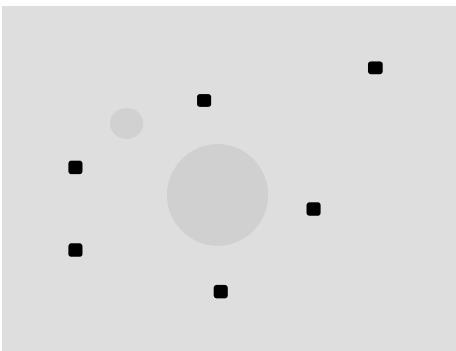
**тунельна багатофононна
іонізація домішкових
центрів**



Механізми перетворення

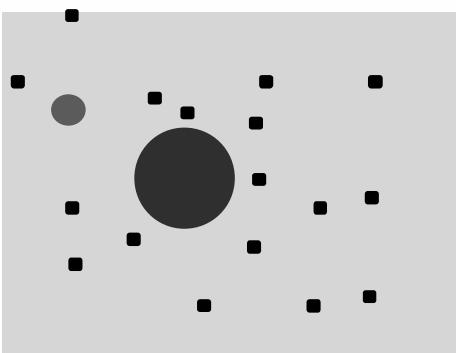


$$\mathbf{D}_\gamma = \mathbf{0}$$



10 кГр

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

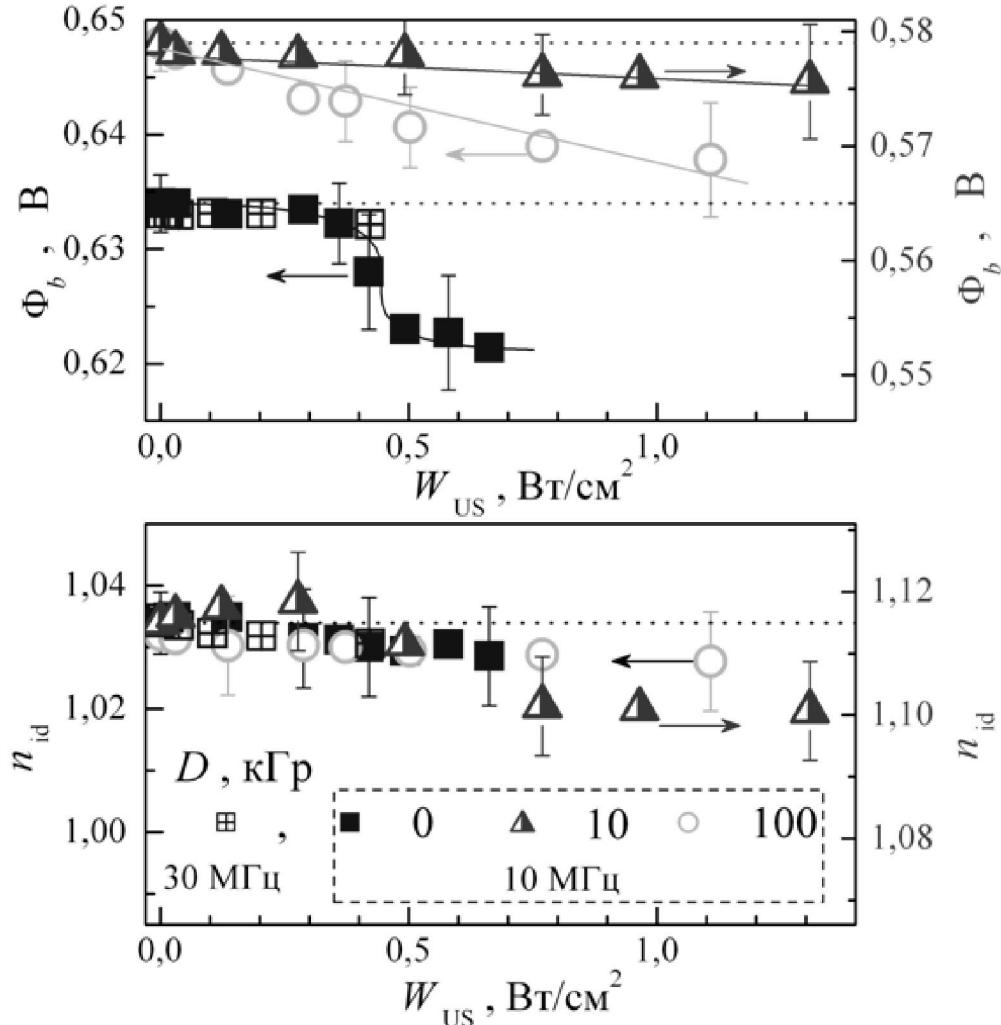


100 кГр

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



УЗ навантаження, пряний струм



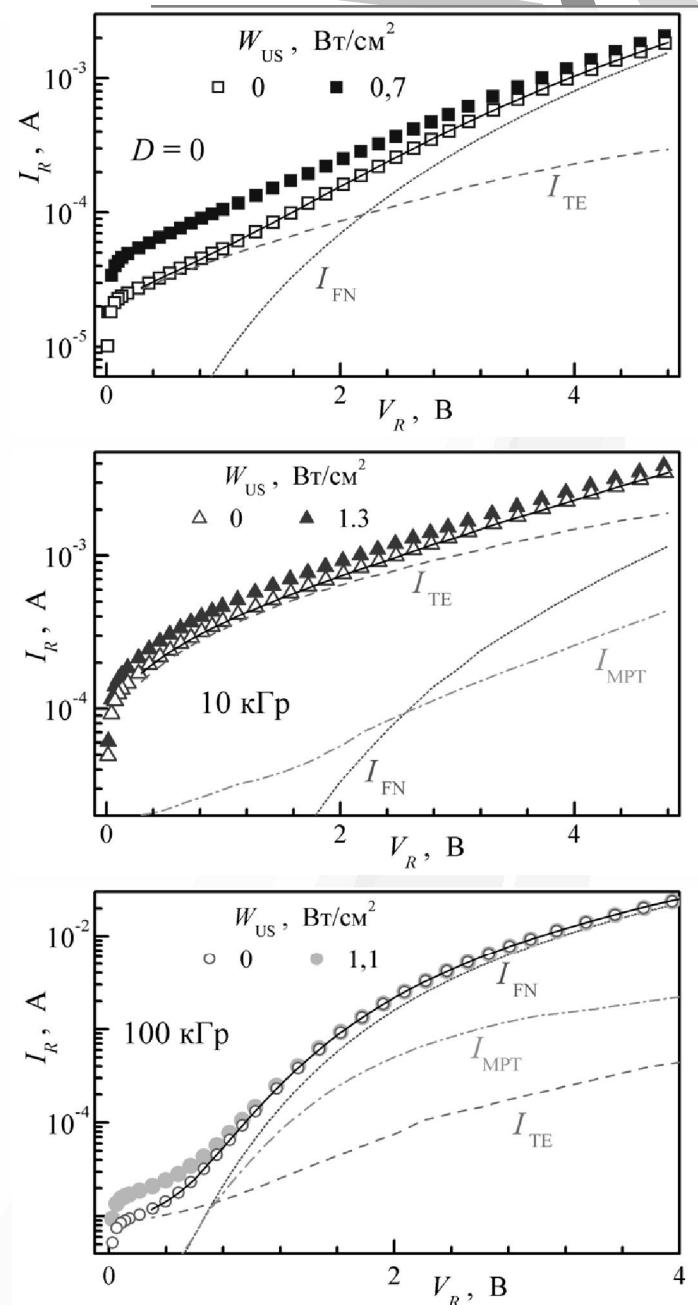
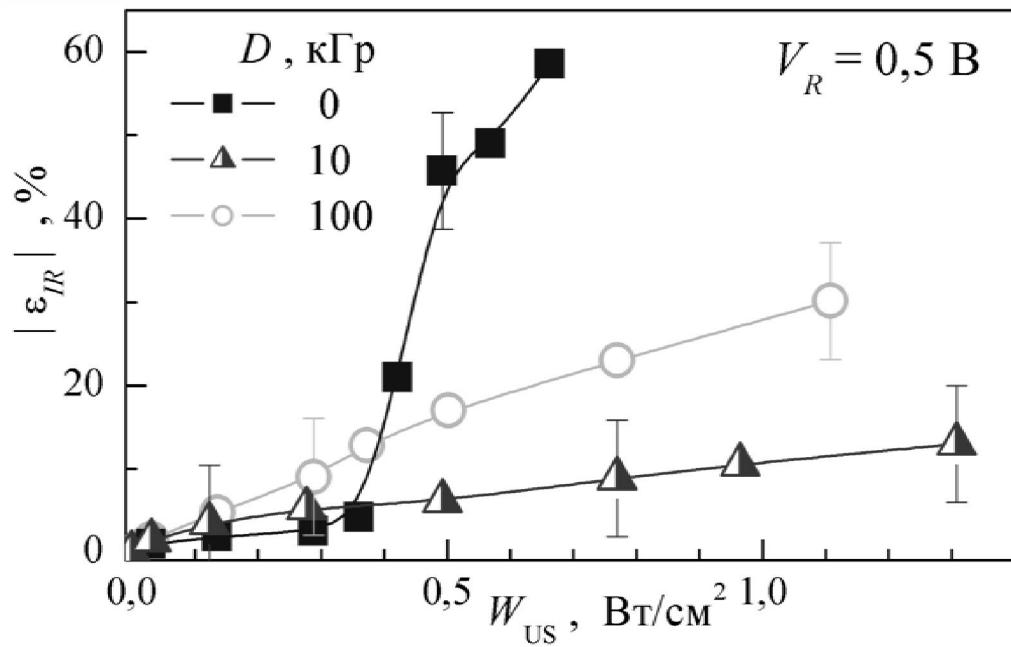
$T = 305$ К

- Виявлено ефект обертоної 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

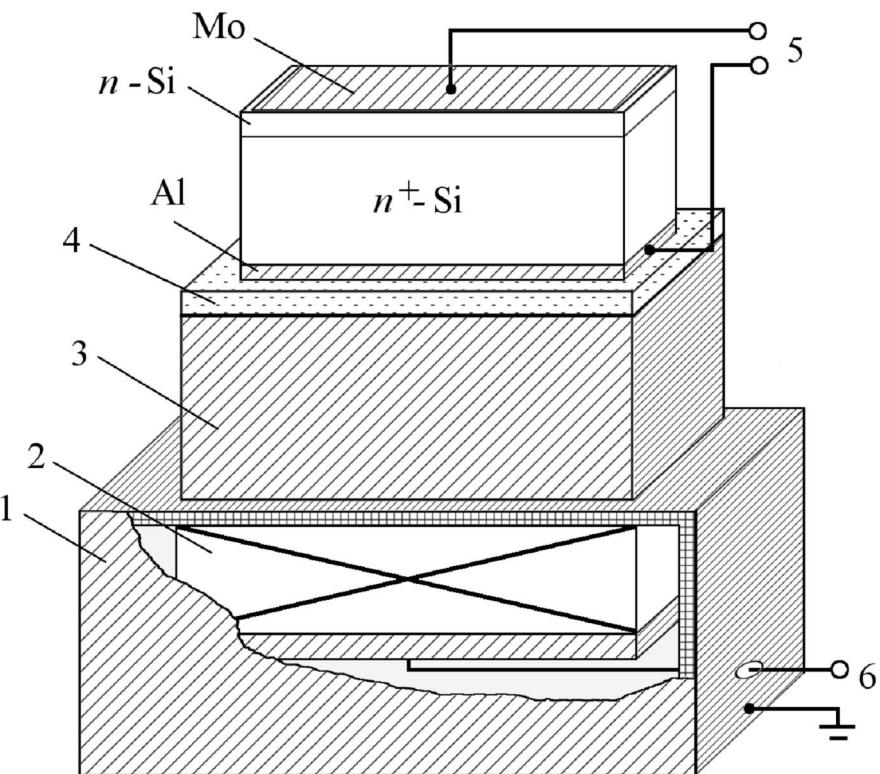


УЗН, зворотний струм

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



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



УЗН:

$$f_{us} = 4 - 28 \text{ МГц}$$

$$W_{us} < 0.5 \text{ Вт/см}^2$$

$$T = 130 - 330 \text{ К}$$

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

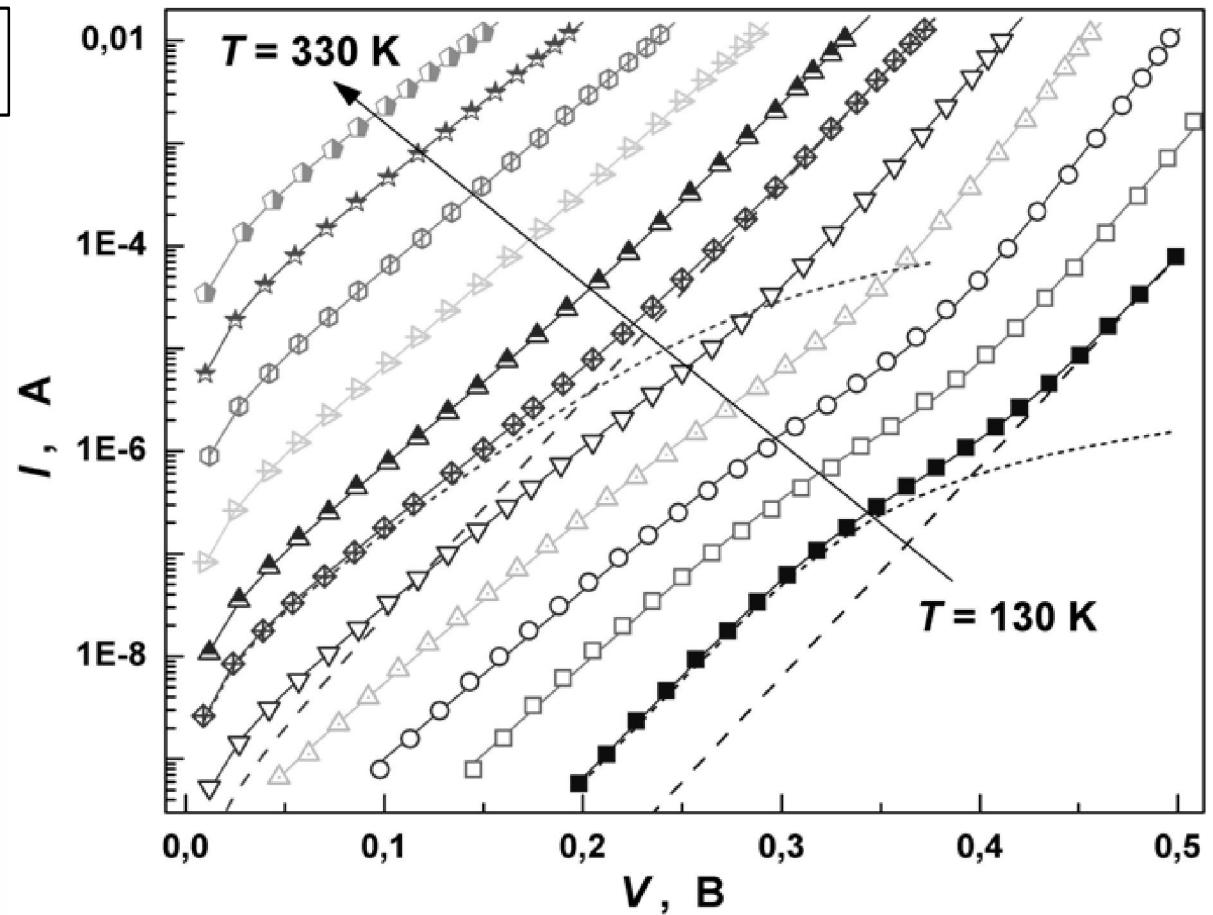


Прямий струм

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

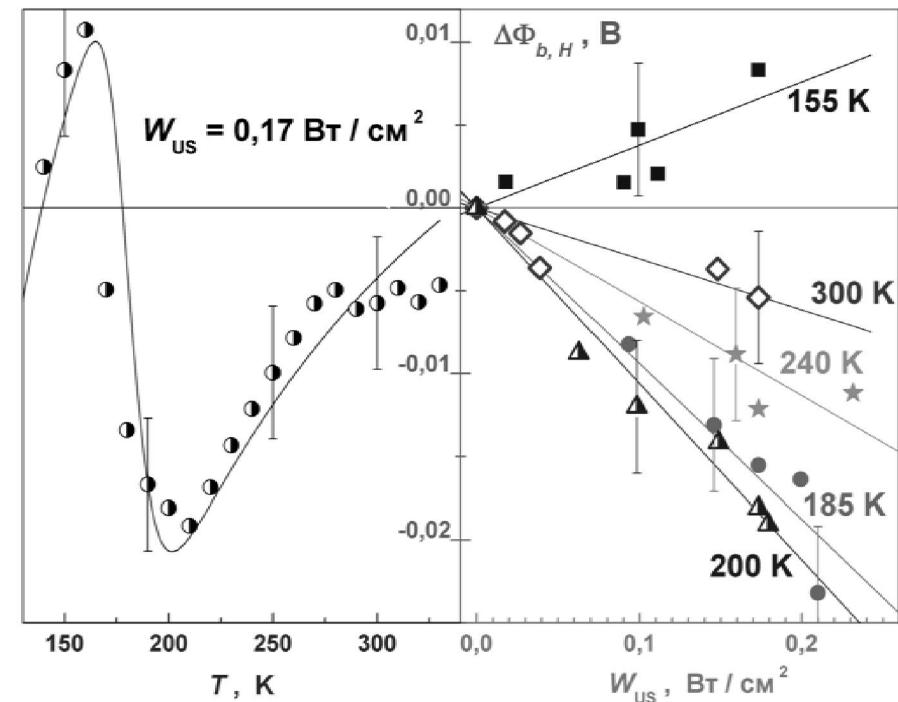
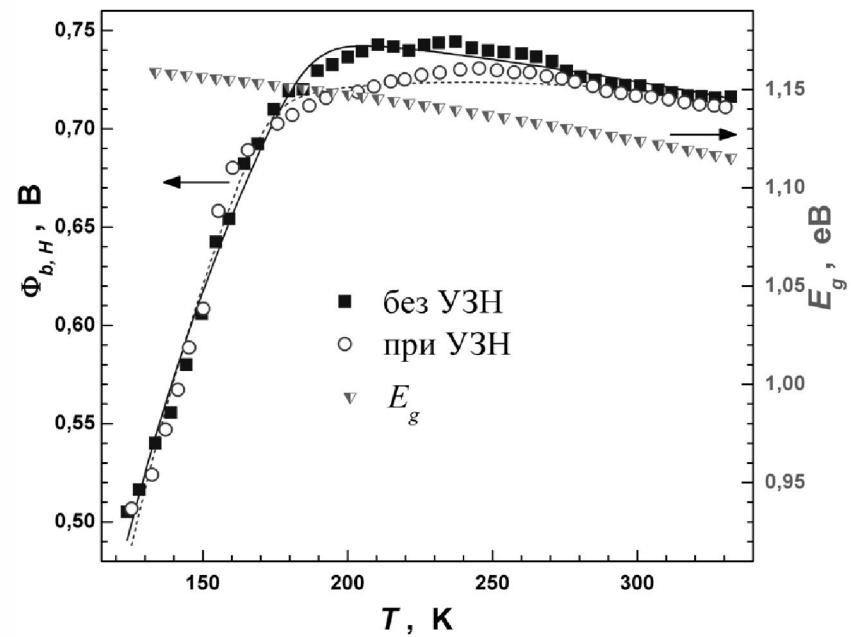
ВТКС

НТКС





Прямий струм, ВТКС



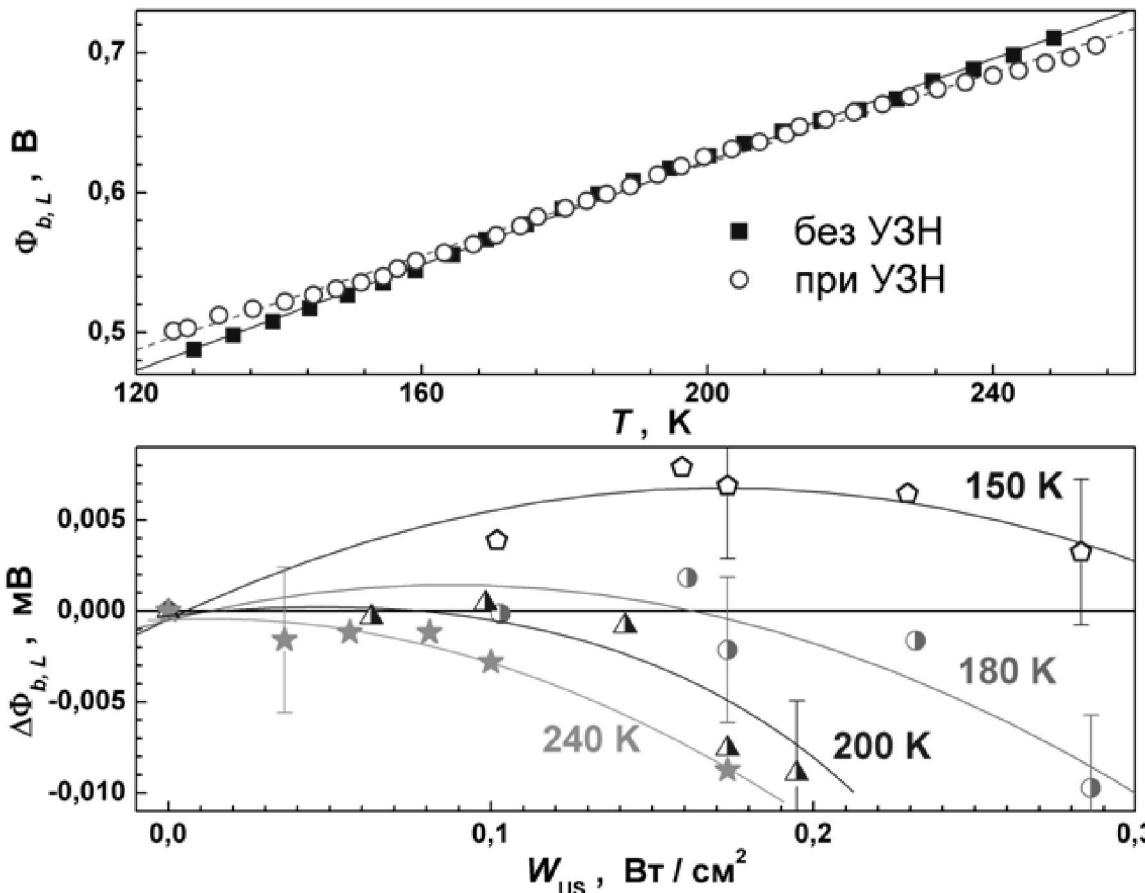
$$\Phi_b = -\frac{kT}{q} \ln \left[\varrho_1 \exp \left(-\frac{q\Phi_{b,1}^0}{kT} + \frac{q^2 \sigma_{\Phi,1}^2}{2k^2 T^2} \right) + \varrho_2 \exp \left(-\frac{q\Phi_{b,2}^0}{kT} + \frac{q^2 \sigma_{\Phi,2}^2}{2k^2 T^2} \right) \right]$$

| | | | | | | | | | | |
|---------|---------------------|-----|---------------------|------|------------------------|----|------------------------|-----|------------------------------|-----|
| без УЗН | $\Phi_{b,1}^0$, мВ | 780 | $\Phi_{b,2}^0$, мВ | 1100 | $\sigma_{\Phi,1}$, мВ | 20 | $\sigma_{\Phi,2}$, мВ | 120 | A^* , А/(смК) ² | 116 |
| при УЗН | | 810 | | 1200 | | 50 | | 130 | | 112 |



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 м^{-2}

2
21

γ_p ,
 $10^{-5} \text{ м}^{2/3} \text{ В}^{1/3}$

2,7
2,5

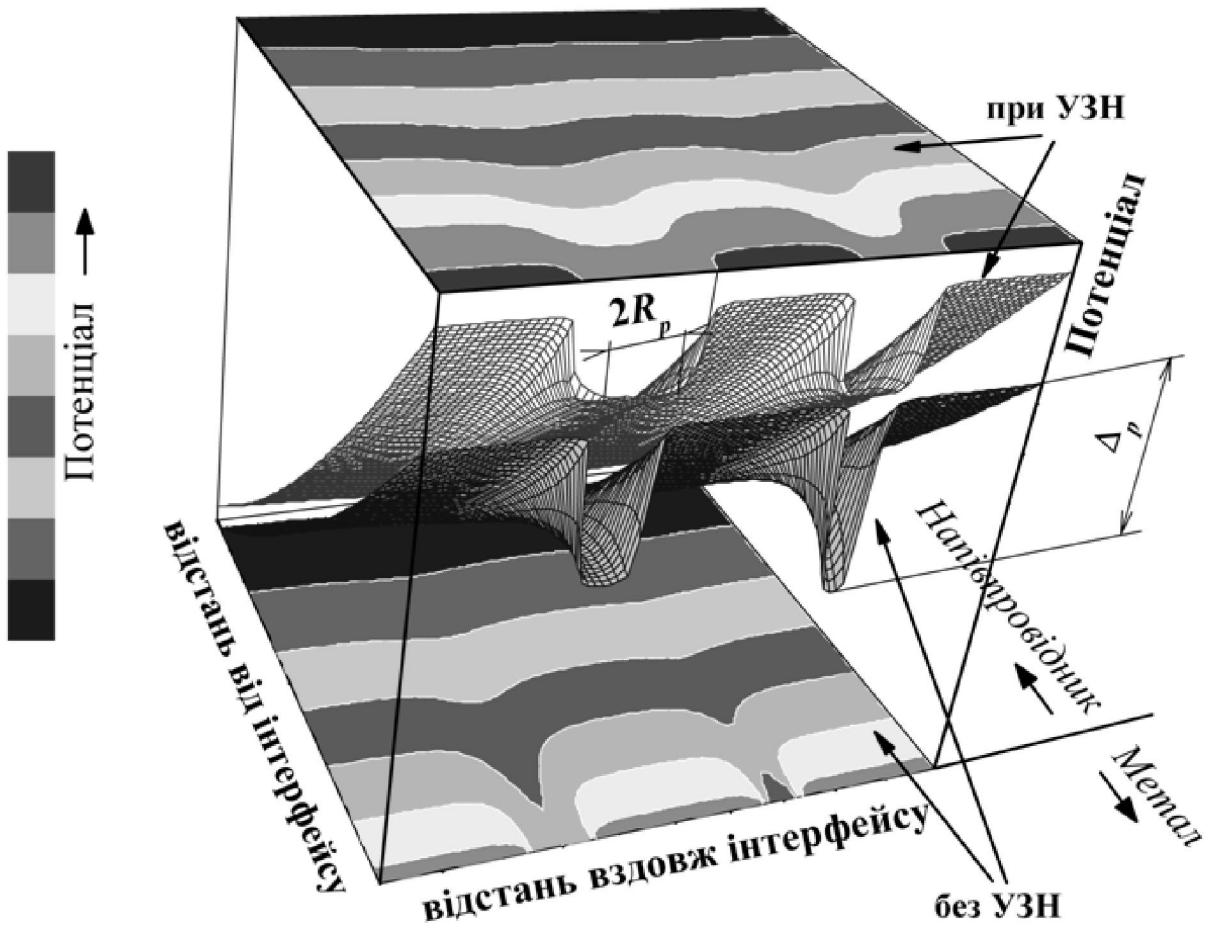
C_p – густина патчів

$$\gamma_p = 3 \left(\frac{R_p^2 \Delta_p}{4} \right)^{1/3}$$

R_p – розмір патчу
 Δ_p – зниження
висоти бар’єру



Вплив УЗН на стан контакту МН



При поширенні УЗ:

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



Механізм впливу УЗ

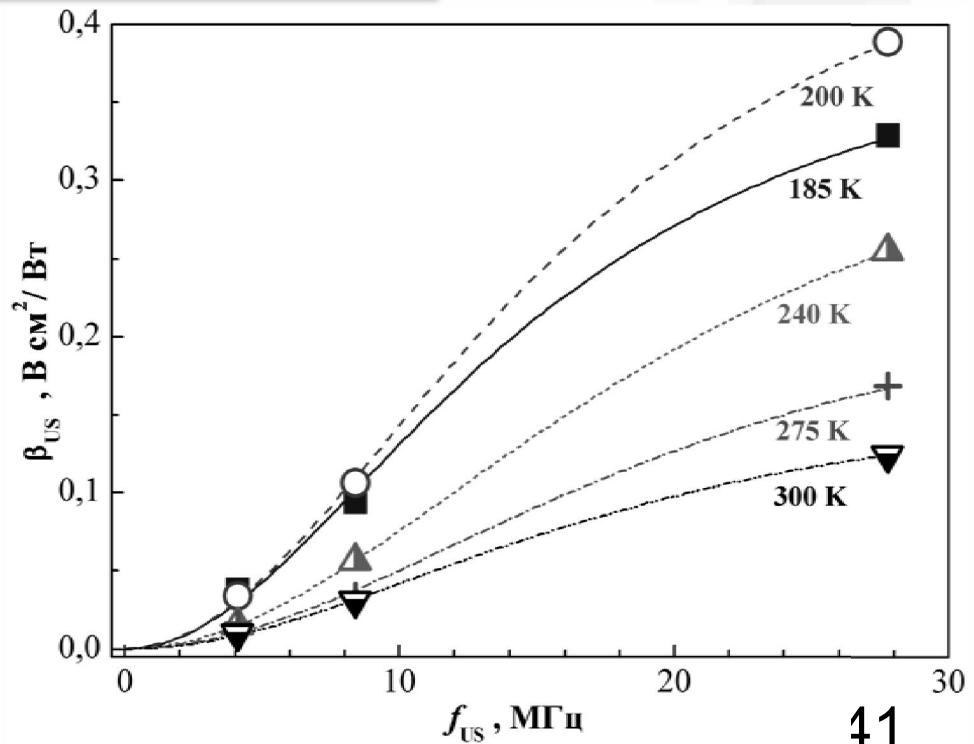
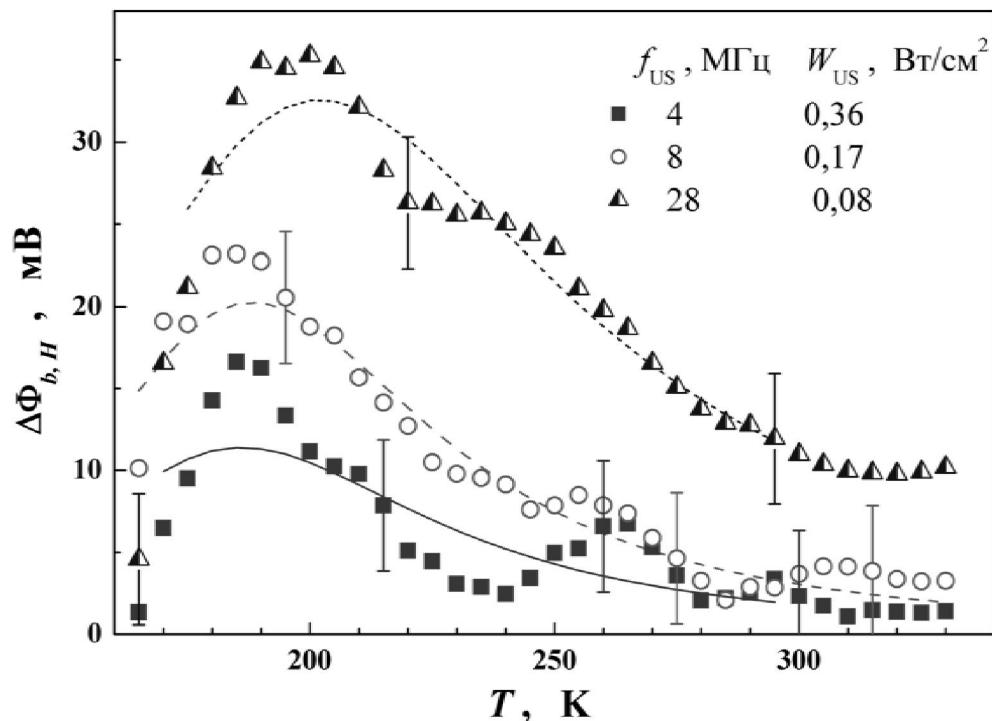
$$\Delta\Phi_{b,H}(f_{\text{US}}, T) = \beta_{\text{US}}(f_{\text{US}}, T) \cdot W_{\text{US}} \sim \frac{f_{\text{US}}}{T} \frac{(f_{\text{US}}/f_k) \exp\left(\frac{W_k}{kT}\right)}{1 + (f_{\text{US}}/f_k)^2 \exp\left(\frac{2W_k}{kT}\right)} W_{\text{US}}$$

Модель Бр
дислокаций

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

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

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





Зворотний струм, механізми

1) термоемісія

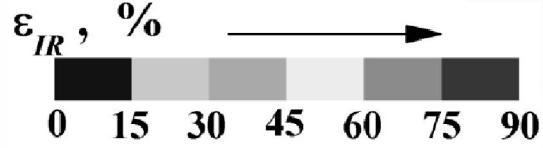
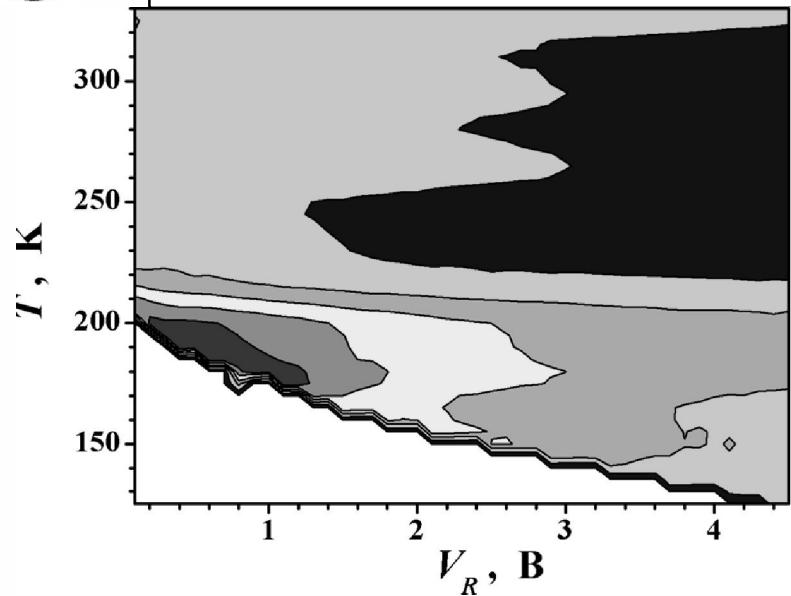
2) тунелювання з поверхневих станів

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

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



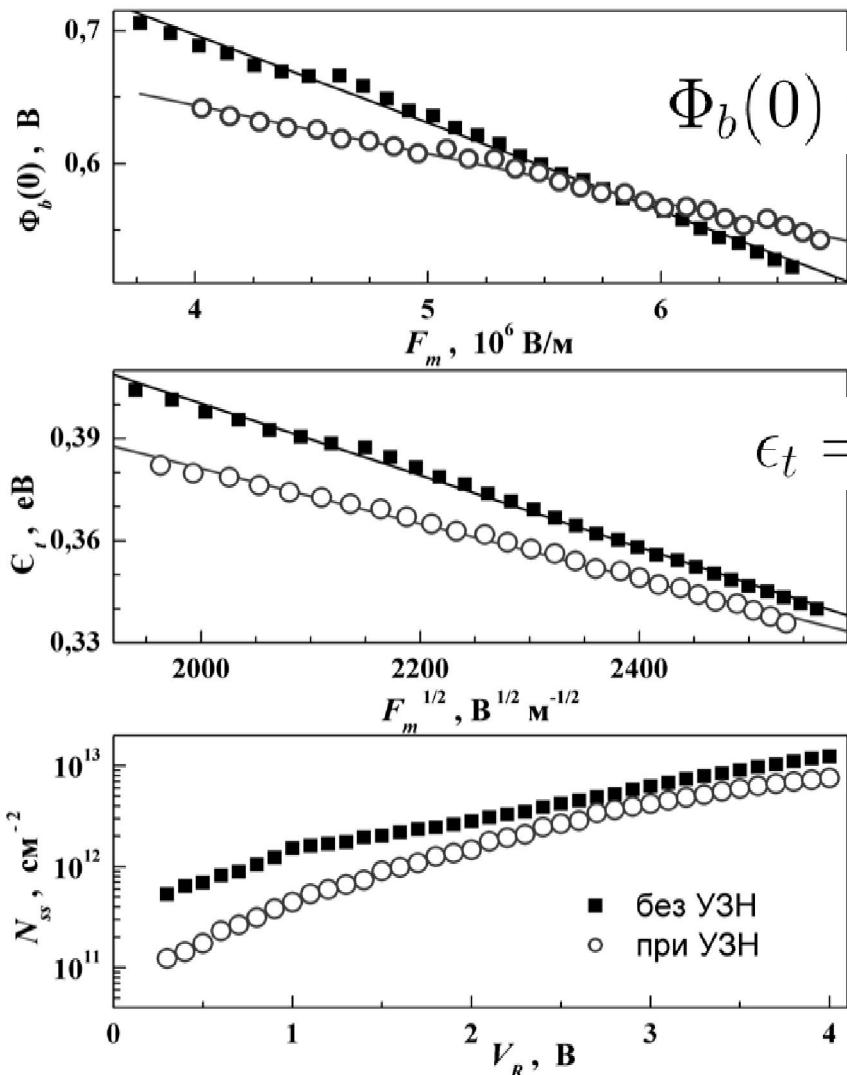
Al зростання



P_t – ймовірність тунелювання
на заповнених рівнів
еїя фонону
станта електрон-
ззаємодії
на залягання рівнів



Al зростання зворотного струму



$$\Phi_b(0) = \Phi_{b0}(0) - \alpha_F F_m$$

$$\epsilon_t = \epsilon_{t0} - \beta_F F_m^{1/2}$$

| | без УЗН | при УЗН |
|---|---------|---------|
| Φ_{b0} , мВ | 960 | 790 |
| α_F , нМ | 66 | 36 |
| ϵ_{t0} , меВ | 610 | 520 |
| β_F , 10^{-5} еВ (м/Б) $^{1/2}$ | 10 | 7 |

ПРИЧИНИ

- зміна розмірів дефектних кластерів

- підсилення емісії електронів з пасток



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

зразки

(100)
GaAs : Sn
 $4 \cdot 10^{16}$; $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

(100)
GaAs : Te
 $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

GaAs:Te, 6 мкм,
 $(3,5; 3,9; 5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

6H-SiC:N
 $2 \cdot 10^{18}$; $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

(111)
GaAs : Te
 $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

(100)
GaAs : Te
 $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

GaAs:Te, 1 мкм, $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

GaAs:Te, 2 мкм, $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

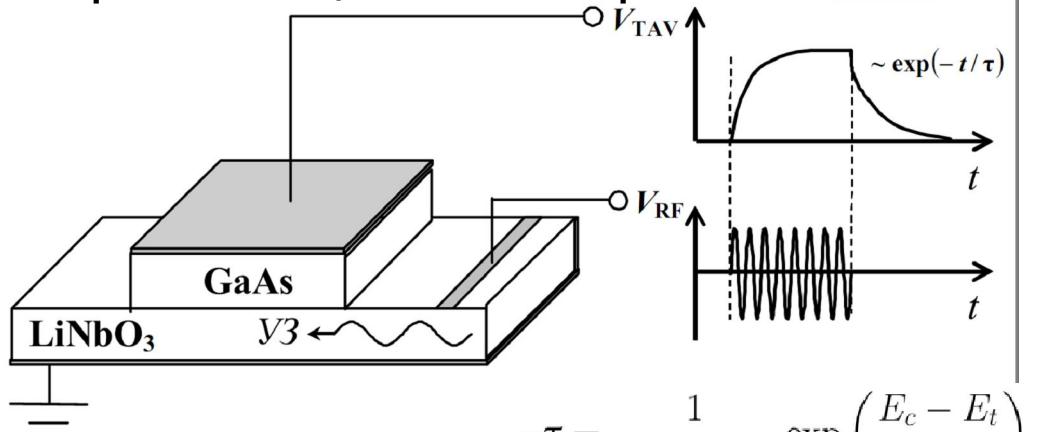
параметри МХО

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

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

методи

- ✓ акустоелектрична релаксаційна спектроскопія



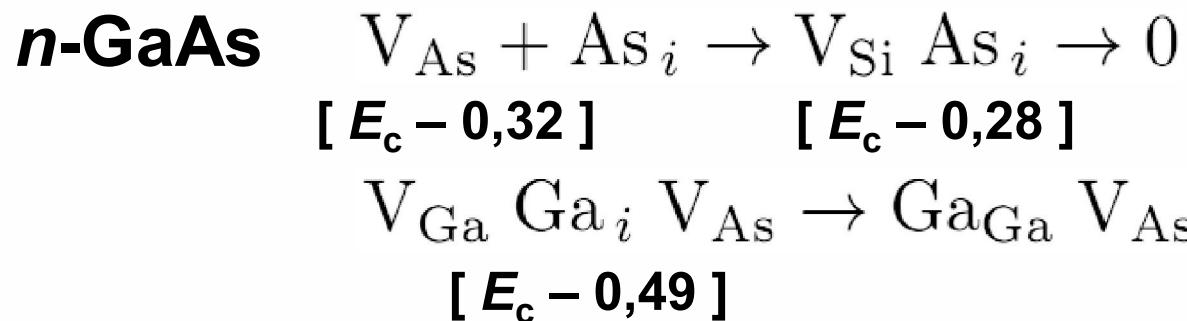
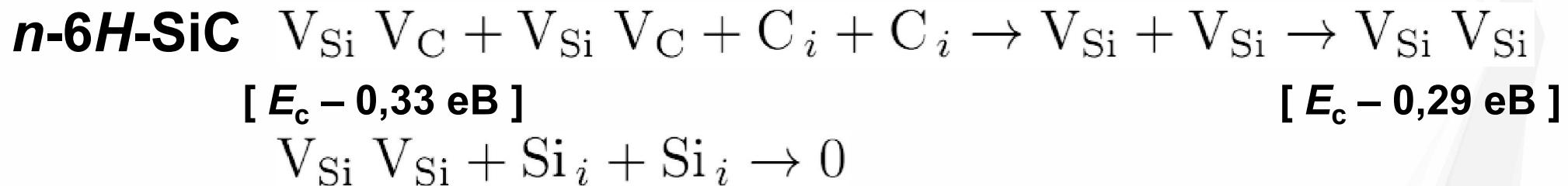
$$\tau = \frac{1}{\sigma_n v_{\text{th},n} N_c} \exp \left(\frac{E_c - E_t}{kT} \right)$$

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

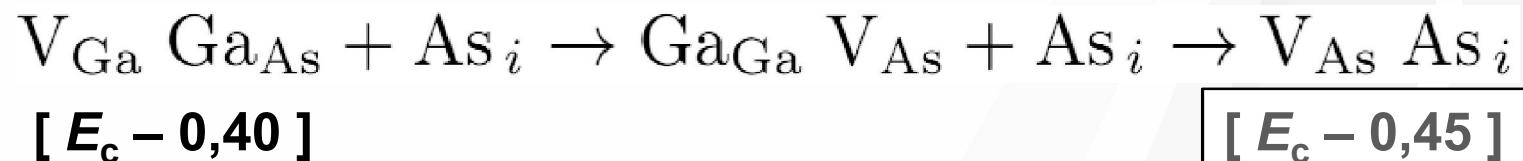
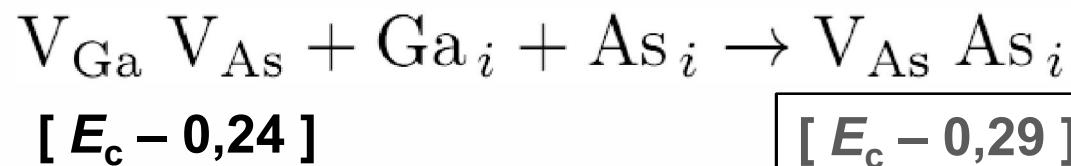


Перетворення дефектів

МОНОКРИСТАЛИ

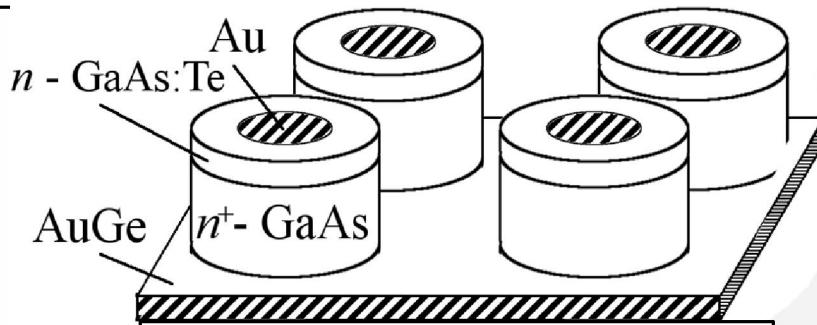


ЕПІТАКСІЙНІ СТРУКТУРИ GaAs

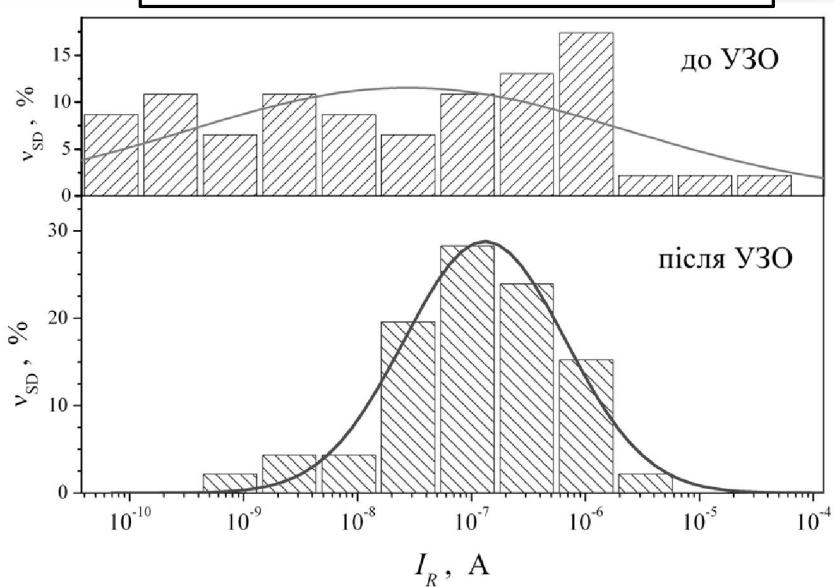
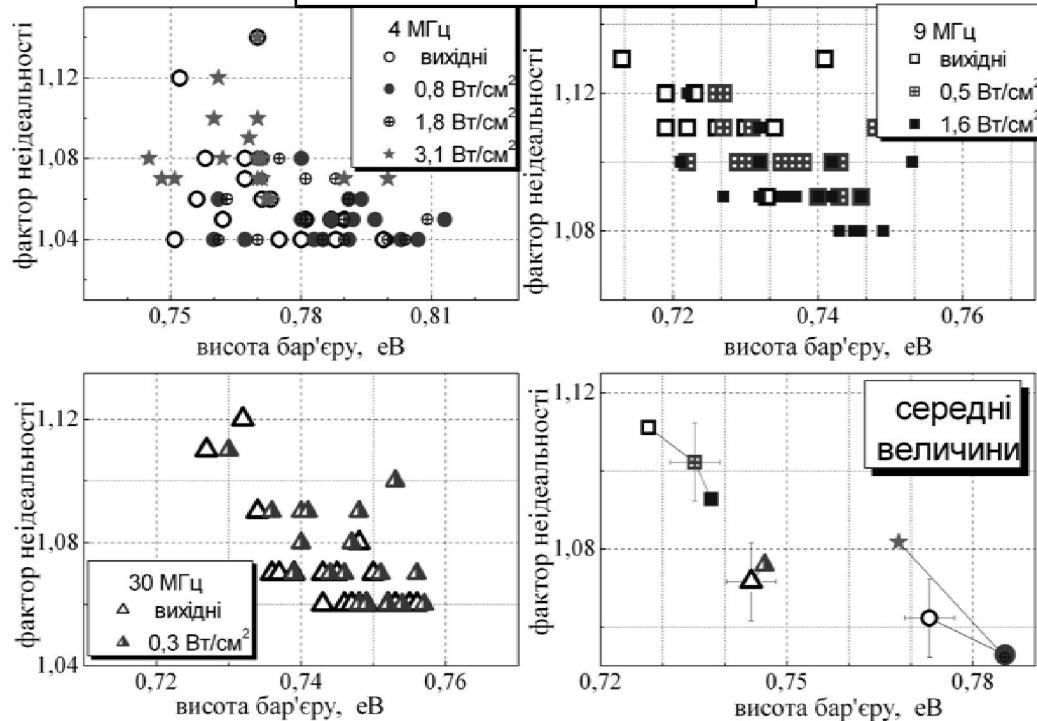




Ультразвукова обробка Au-TiB_x-n-n+-GaAs



прямий струм



**протилежний вплив на тунельну
та термоемісійну складові струму**

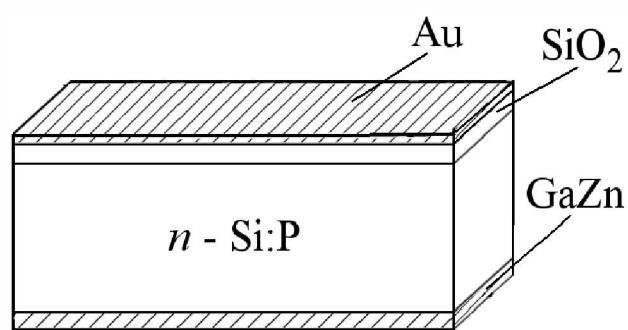
- **сгладжування неоднорідностей потенціального рельєфу контакту**

- **збільшення концентрації домішок у приконтактній області**



Акустовідпал γ-опромінених структур Si–SiO₂–Au

ν-кванти ⁶⁰Co



УЗО:

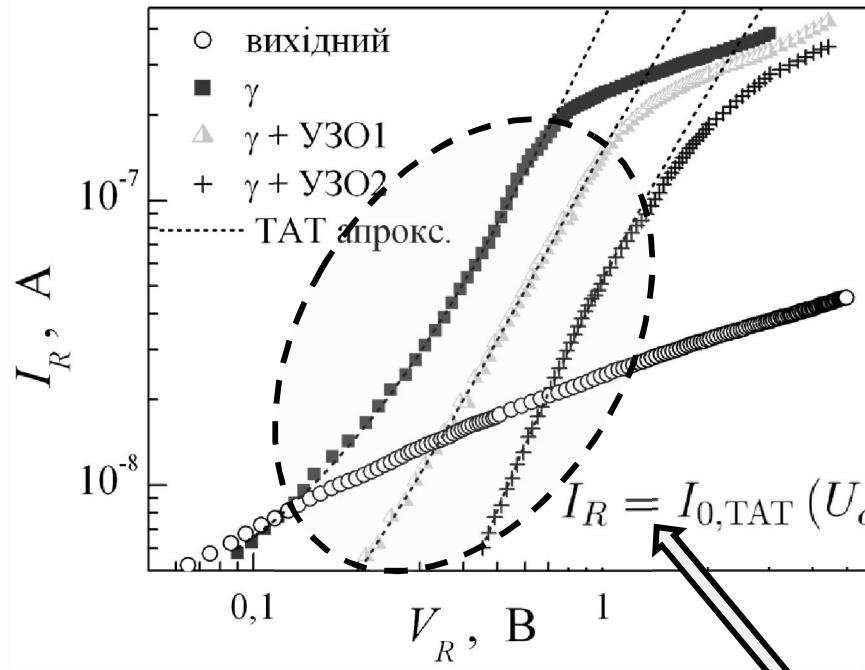
$$f_{\text{US}} = 4 \text{ МГц}$$

$$W_{\text{US}} = 2 \text{ Вт/см}^2$$

$$t_{\text{UST}} = 30 \div 60 \text{ хв}$$

$$T = 350 \text{ К}$$

зворотний струм



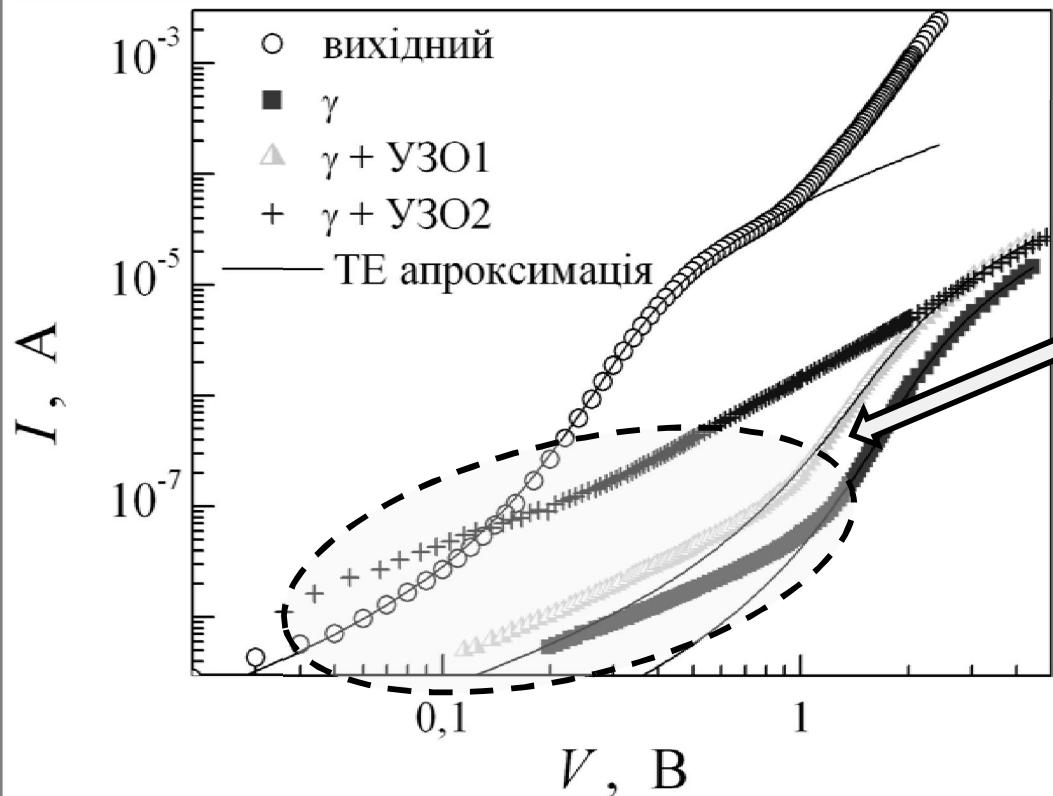
γ-кванти → поява ТАТ струму внаслідок утворення E' -центрів (вакансії кисню в SiO_2)

УЗО → відпал радіаційних дефектів внаслідок акустоіндукованої дифузії атомів кисню

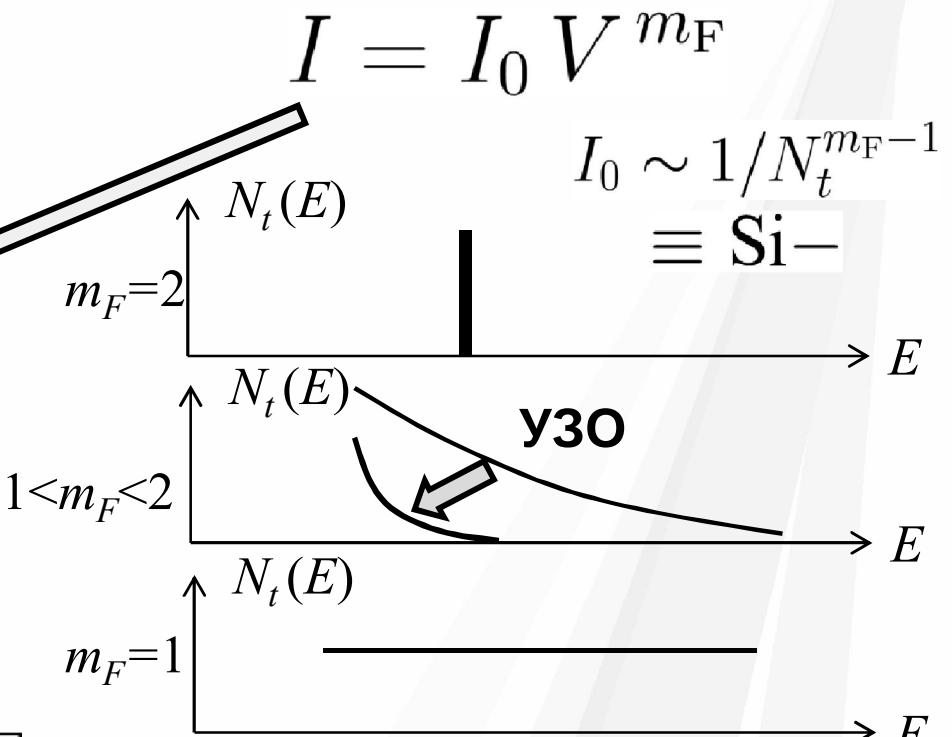


Акустовідпал γ-опромінених структур Si–SiO₂–Au

прямий струм



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



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

| Стан структури | | | | |
|----------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|
| γ-опромінення | – | + | + | + |
| t_{UST} , хв | 0 | 0 | 30 | 60 |
| Параметр | | | | |
| m_F | | 1,3 | 1,6 | 1,8 |
| I_0 | | $4,5 \cdot 10^{-8}$ | $1,3 \cdot 10^{-7}$ | $1,5 \cdot 10^{-6}$ |



Висновки

- ✓ Виявлена оборотна акустоіндукована деградація кремнієвих сонячних елементів, як вихідних, так і опромінених нейтронами або γ -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.



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 $Si-SiO_2$.