



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– фізика твердого тіла

Київ – 2018

### Предмет дослідження

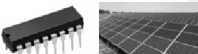



ефекти впливу ультразвукового навантаження та опромінення на процеси проходження струму та фотоелектричного перетворення у поверхнево-бар'єрних кремнієвих та арсенід-галієвих структурах

### 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 напівпровідникових поверхнево-бар'єрних структурах

2

### 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 диференціальних 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;
- контрольоване радіаційне та мікрохвильове опромінення;
- метод ультразвукового навантаження.

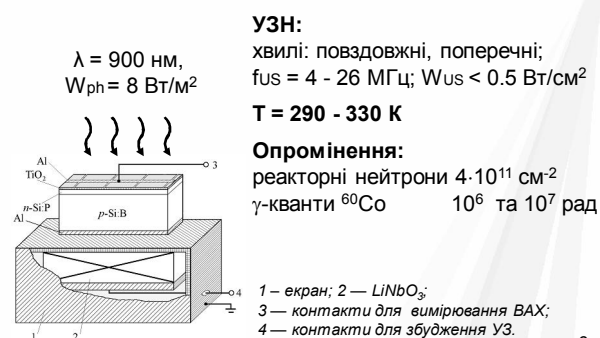
4

### 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  $\gamma$ -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

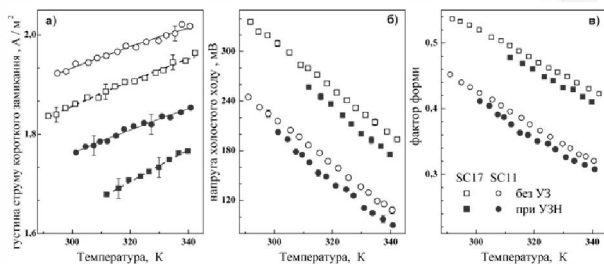


6

KCE + УЗН

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

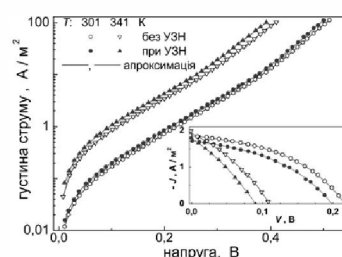
виявлено: USID (ультразвук) --- ефект, оборотний при кімнатних температурах



7

KCE + УЗН

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

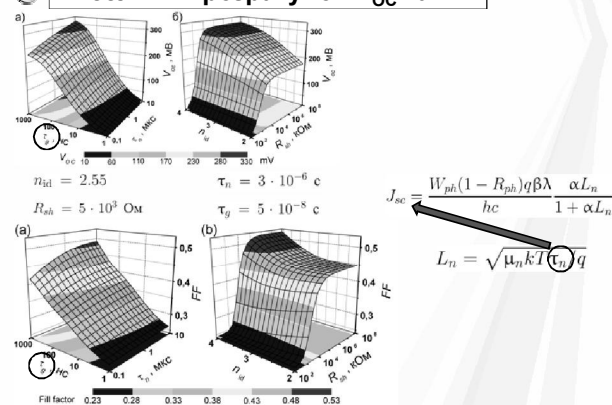


апроксимация

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

8

KCE + УЗН

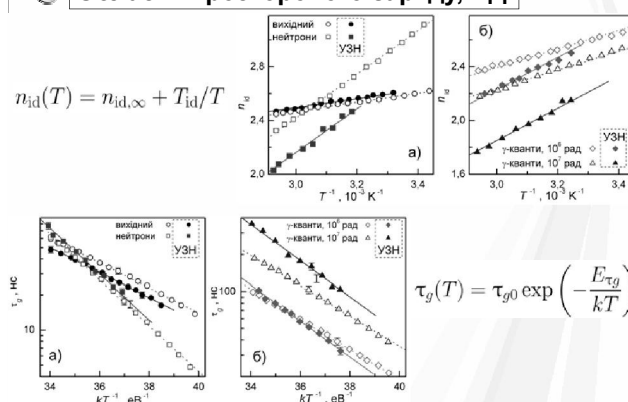
Чисельний розрахунок  $V_{oc}$  та  $FF$ 

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

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

KCE + УЗН

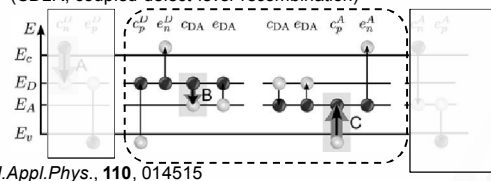
## Область просторового заряду, РД



KCE + УЗН

## Область просторового заряду

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



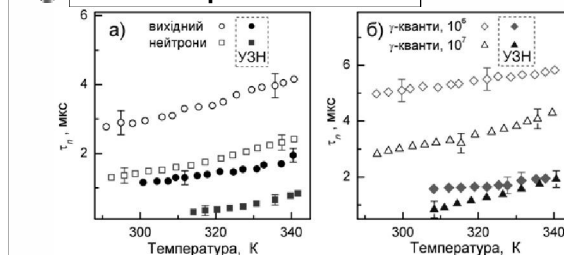
$$R = \frac{R_{12} - \sqrt{R_{12}^2 - 4\tau_n^A \tau_p^A (np - n_i^2)(1 - \epsilon)}}{2\tau_n^D \tau_p^A (1 - \epsilon)}$$

$$R_{12} = \frac{(n + n_D)(p + p_A) + \tau_n^D(p + p_D) + \tau_p^A(n + n_A)}{(N_D \tau_n^D \nu_{th,n})^{-1} + (N_A \tau_p^A \nu_{th,p})^{-1}}$$

11

KCE + УЗН

## Квазі-нейтральна область



рекомбінація Шоклі-Ріда-Хола

експеримент:

$$\tau_n^{-1} = \sum_i M_d \tau_{n,i}^{-1} = \sum_i M_d N_d (\sigma_{n,i}^A \nu_{th,n})^{-1}$$

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

амплітуда зміщень атомів при поширенні УЗ

12

КСЕ + УЗН

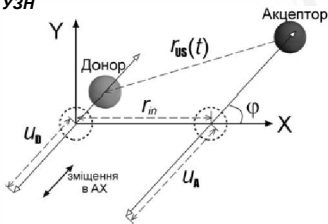
## Модель акустоактивного комплексного дефекту

сила на точковий дефект під час УЗН

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

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

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



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

13

КСЕ + УЗН

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

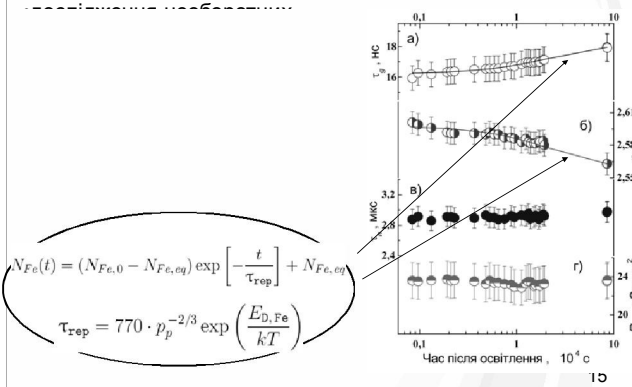
$K_{US}^{DA}$  – характеризує взаємодію УЗ з комплексним дефектом

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

14

КСЕ + УЗН

## Оцінка дефектного складу



КСЕ + УЗН

## Оцінка дефектного складу

- кисневмісні преципітати  $E_c + 0.22 \text{ eV}$   $\sigma_n/\sigma_p = 157$   
 $E_c - 0.08 \text{ eV}$   $\sigma_p/\sigma_n = 1200$   
**CDLR процес**
- пари  $\text{Fe}_i\text{B}_s$   $E_c - 0.43 \text{ eV}$   
 другорядні в ОПЗ

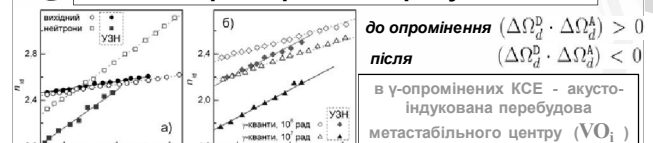
## ОПРОМІНЕННЯ:

	концентрація, $10^{11} \text{ см}^{-3}$			
	$\text{C}_i\text{O}_i$	$\text{V}_2$	$\text{V}_3$	$\text{VO}_i$
нейтрони, $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$	5,5	4,8	1,5	2
$\gamma$ -кванти $^{60}\text{Co}$ , $10^6 \text{ рад}$	6	0,3	-	60
$10^7 \text{ рад}$	60	3	-	70

17

КСЕ + УЗН

## Область просторового заряду + модель



## Квазінейтральна область + модель

визначено коефіцієнти акусто-дефектної взаємодії

$$K_{US}^{AA} > 5 \text{ см}^2 \text{ Вт}^{-1} \quad K_{US}^{CD} = 0$$

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

Дивакансія – акустоактивний дефект,  $\text{C}_i\text{O}_i - \text{Ni}$

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

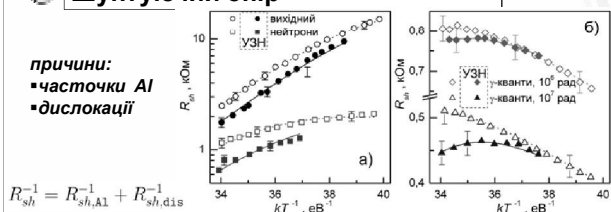
в  $\gamma$ -опромінених КСЕ – акусто-індукована перебудова метастабільного центру ( $\text{VO}_i$ )



КСЕ + УЗН

## Шунтуючий опір

причини:  
• часточки AI  
• дислокації



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

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

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

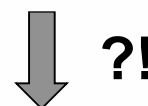
$$\sigma_{dis} = \rho_{dis} A q^2 A_{dis} \sqrt{K_n K_p} N_{dis} (n_p + p_p) / k$$

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

19

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУР МЕТАЛ-НАПІВПРОВІДНИК

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



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

20

Методи

## Методи

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

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

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

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 рівнем випадкових похибок

➢ виміряні експериментально (структури AI-p-n-Si)

21

Методи

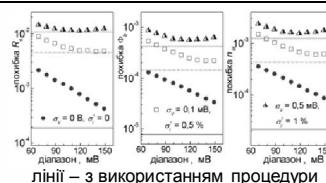
## Оптимізація

Метод Norde:  $\gamma_N = 1,8$

✓ визначено оптимальні значення параметрів (методи Norde, Bohlin)

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

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



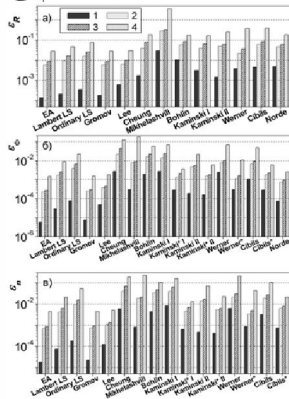
✓ запропоновано адаптивну процедуру вибору діапазону напруг при побудові допоміжної функції (методи Gromov, Lee, Chung)

✓ проведено визначення необхідної кількості поколінь для збіжності еволюційних алгоритмів

22

Методи

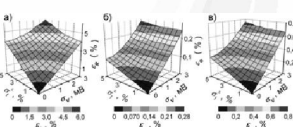
## Визначено вплив похибок вимірювань



Похибки визначення  $R_s$  (а),  $\Phi_b$  (б) та  $n_{id}$  (в) за наборів даних з похибками.

$\sigma_V$ , мВ: 0 (1), 0,3 (2, 3), 2 (4).

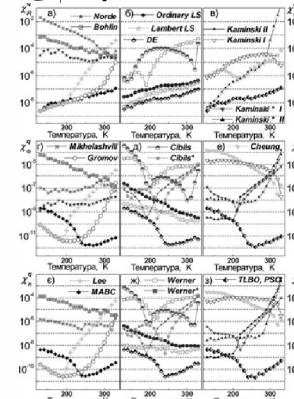
$\sigma_I$ , %: 0 (1), 0,5 (2), 1 (3, 4).



23

Методи

## 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	$(0,2 \div 3,3) \cdot 10^{-5}$	Kaminski I	$(4,3 \div 8,0) \cdot 10^{-5}$
Kaminski II	$(0,3 \div 2,6) \cdot 10^{-5}$	Bohlin	$(4,0 \div 6,3) \cdot 10^{-5}$
Lee	$(0,2 \div 3,6) \cdot 10^{-5}$	Gromov	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Chung	$(2,9 \div 3,2) \cdot 10^{-5}$	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	$0,14 \div 0,35$
MAEC	$5,7 \cdot 10^{-2} \div 0,20$	TLBO	$5,4 \div 19,2$

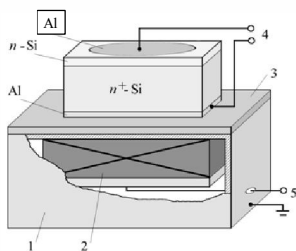
наїефективніші:

• еволюційні алгоритми

• чисельні методи

• метод Gromov з адаптивною процедурою

## ЕФЕКТИ ВПЛИВУ $\gamma$ -ОПРОМІНЕННЯ ТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ КІМНАТНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ НА СТРУКТУРИ Al-n-n<sup>+</sup>-Si



ВАХ:  
T = 120 - 330 K

Опромінення:  
 $\gamma$ -кванти  $^{60}\text{Co}$ ,  
10 кГр та 100 кГр

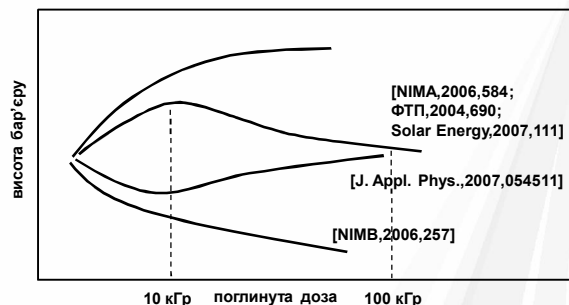
УЗН:  
fus = 10 - 30 МГц  
 $W_{us} < 1.5 \text{ Вт/см}^2$   
T = 305 K

25

Al-n-n<sup>+</sup>-Si +  $\gamma$ 

### Радіаційні зміни висоти бар'єра

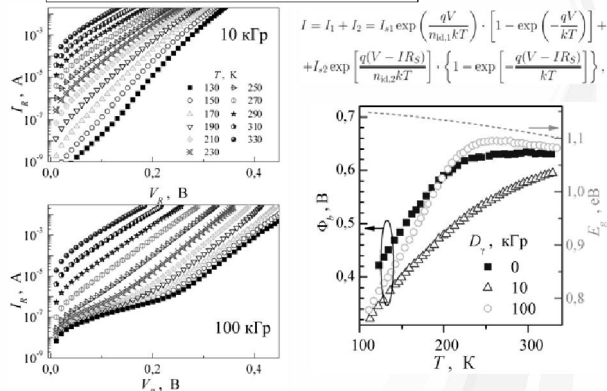
характер немонотонності ???!



26

Al-n-n<sup>+</sup>-Si +  $\gamma$ 

### Опромінені, прямі гілки ВАХ

Al-n-n<sup>+</sup>-Si +  $\gamma$ 

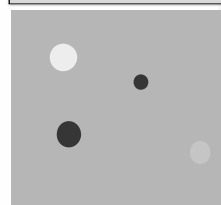
### Моделі неоднорідного контакту

розподіл Гауса для  $\Phi_b$ 

однорідний бар'єр з окремими патчами



$\Phi_b^0$  – середнє значення  
 $\sigma_\Phi$  – стандартне відхилення



$\Phi_b^0$  – однорідна ділянка  
 $\sigma_\gamma$  – стандартне відхилення параметрів патча

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

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

28

Al-n-n<sup>+</sup>-Si +  $\gamma$ 

### Прямий струм

Доза, кГр

ТЕ, неоднорідний бар'єр

 $\Phi_b^0 = 663 \text{ мВ}$  $\Phi_{b,patch} = 54 \text{ мВ}, \sigma_\Phi = 40 \text{ мВ}$ 

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

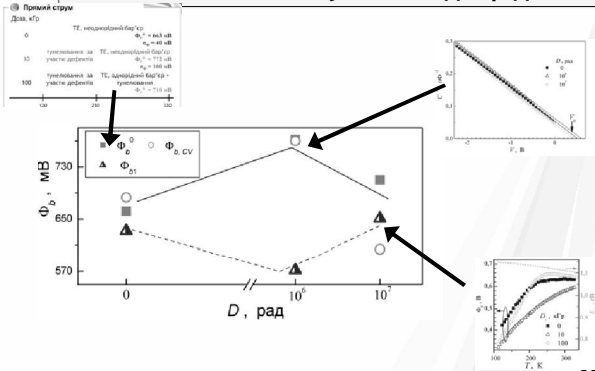
250

Температура, К

29

Al-n-n<sup>+</sup>-Si +  $\gamma$ 

### характер немонотонності $\Leftrightarrow$ ступінь неоднорідності



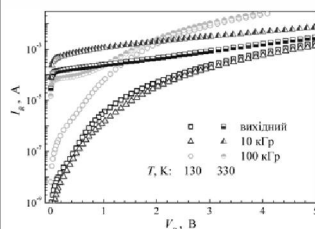
Al-n-n<sup>+</sup>-Si + γ

## Зворотний струм

до опромінення

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

після опромінення



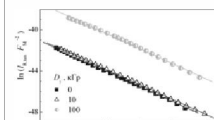
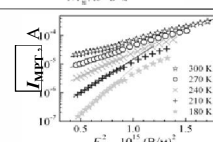
31

Al-n-n<sup>+</sup>-Si + γ

## Зворотний струм

$$I_R(T, V_R) = \underbrace{C_{TE}(V_R) T^2 \exp \left[ -\frac{E_{TE}(V_R)}{kT} \right]}_{\text{термоелектронна емісія}} + \underbrace{I_{FN}(V_R)}_{\text{пряме тунелювання за участю рівня міжвузлового атому вуглецю}} + \underbrace{I_{MPT}(T, V_R)}_{\text{тунельна багатофононна іонізація домішкових центрів}}$$

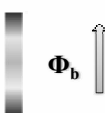
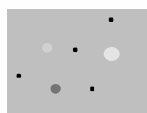
термоелектронна емісія

пряме тунелювання  
за участю рівня  
міжвузлового атому  
вуглецютунельна багатофононна  
іонізація домішкових  
центрів

32

Al-n-n<sup>+</sup>-Si + γ

## Механізми перетворення

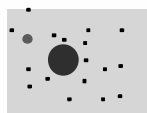


$$D_{\gamma} = 0$$



10 кГр

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



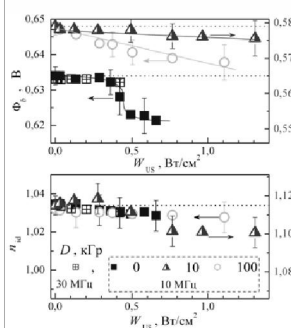
100 кГр

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

33

Al-n-n<sup>+</sup>-Si + γ

## 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

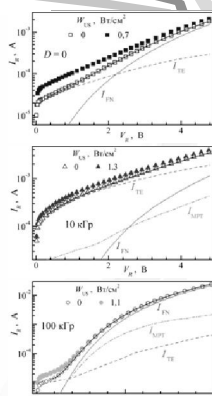
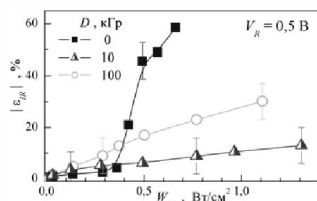
T = 305 K

34

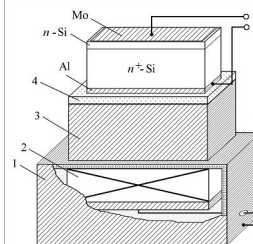
Al-n-n<sup>+</sup>-Si + γ

## УЗН, зворотний струм

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



35

ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІЧНИХ АКУСТОІНДУКОВАНИХ ЗМІН ПАРАМЕТРІВ КРЕМНІЄВИХ ДІОДІВ ШОТТКІ Мо-n-n<sup>+</sup>-Si (130÷330 K)

УЗН:  
f<sub>us</sub> = 4 - 28 МГц  
W<sub>us</sub> < 0.5 Вт/см²  
T = 130 - 330 K

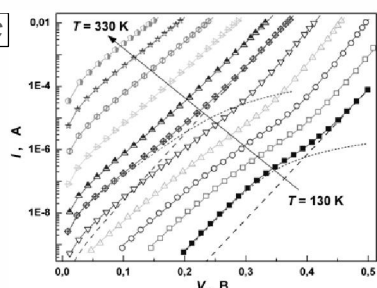
1 – екран; 2 – LiNbO<sub>3</sub>; 3 – буфер;  
4 – слюда; 5 – контакти для  
вимірювання ВАХ; 6 – контакти для  
збудження УЗ.

36

Mo/n-Si + УЗН

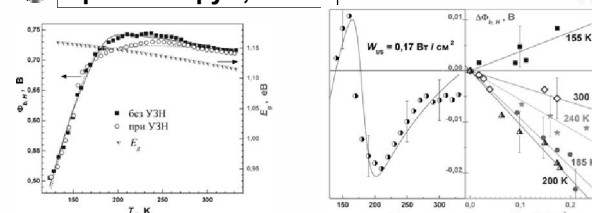
## Прямий струм

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

ВТКС  
НТКС

Mo/n-Si + УЗН

## Прямий струм, ВТКС



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

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

38

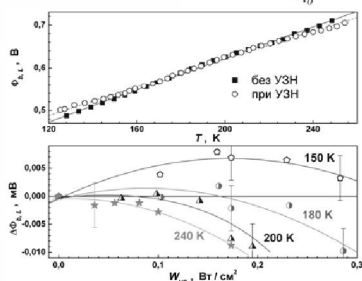
Mo/n-Si + УЗН

## Прямий струм, НТКС

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

 $C_p$  – густина патчів

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

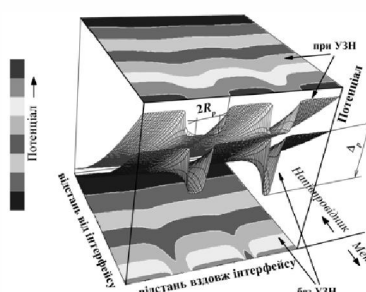
 $R_p$  – розмір патчу $\Delta_p$  – зниження висоти бар'єру

без УЗН	$C_p$ , $10^5 \text{ м}^{-2}$	2	$\gamma_p$ , $10^{-5} \text{ м}^{2/3} \text{ В}^{1/3}$	2,7
при УЗН		21		2,5

39

Mo/n-Si + УЗН

## Вплив УЗН на стан контакту МН



При поширенні УЗ:  
 • згладжування потенціалу  
 • збільшення ефективної густини патчів  
 • зростання висоти бар'єру за межами неоднорідностей

40

Mo/n-Si + УЗН

## Механізм впливу УЗ

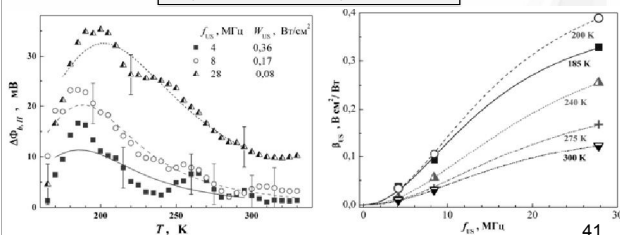
$$\Delta\Phi_{b,H}(f_{us}, T) = \beta_{us}(f_{us}, T) \cdot W_{us} \sim \frac{f_{us}}{T} \frac{(f_{us}/f_k) \exp \left( \frac{W_k}{kT} \right)}{1 + (f_{us}/f_k)^2 \exp \left( \frac{2W_k}{kT} \right)} W_{us}$$

Модель Брейсфолда, рух дислокаційних перегинів

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

$$f_k = \pi D_{0k} / (20 I_0^2)$$

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



41

Mo/n-Si + УЗН

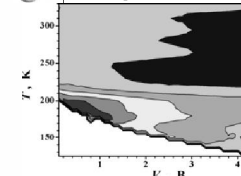
## Зворотний струм, механізми

1) термоемісія 2) тунелювання з поверхневих станів

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

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

## AI зростання

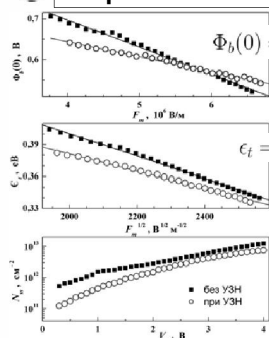


$P_t$  – ймовірність тунелювання  
 $N_{ss}$  – густина заповнених рівнів  
 $\omega_{ph}$  – енергія фонону  
 $a_{e-ph}$  – константа електрон-фононної взаємодії  
 $\epsilon_t$  – глибина залягання рівнів

42

Mo/n-Si + УЗН

## AI зростання зворотного струму



$\Phi_{b0}, \text{mV}$	960	790
$\alpha_F, \text{nm}$	66	36
$\epsilon_{t0}, \text{meV}$	610	520
$\beta_F, 10^{-5} \text{ eV (mV)}^{1/2}$	10	7

## ПРИЧИНИ

• підсилення емісії  
електронів з пасток

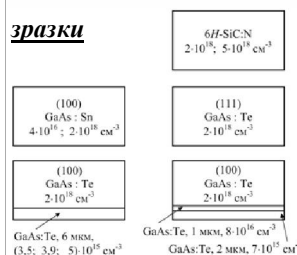
• зміна розмірів дефектних  
кластерів

43

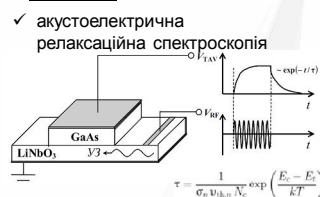
MXO

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

## зразки



## методи



- ✓ акустоелектрична  
релаксация спектроскопія
- ✓ профілометрія
- ✓ визначення деформації  
приповерхневих площин
- ✓ рентгенівська топографія

## параметри MXO

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

44

MXO

## Перетворення дефектів

## МОНОКРИСТАЛИ

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

**n-GaAs**  $V_{\text{As}} + \text{As}_i \rightarrow V_{\text{Si}} \text{As}_i \rightarrow 0$   
 $[E_c - 0,32]$   $[E_c - 0,28]$   
 $V_{\text{Ga}} \text{Ga}_i V_{\text{As}} \rightarrow \text{Ga}_{\text{Ga}} V_{\text{As}} \rightarrow \text{Ga}_{\text{As}} V_{\text{Ga}}$   
 $[E_c - 0,49]$   $[E_c - 0,40]$

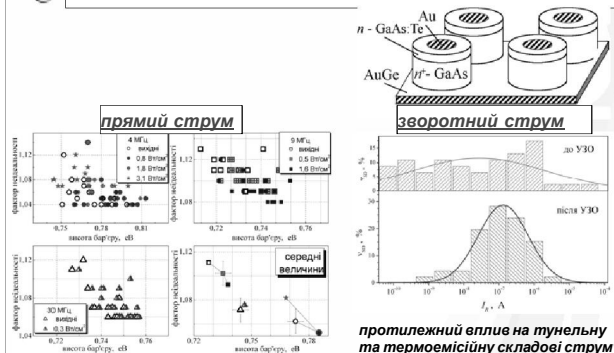
## ЕПІТАКСІЙНІ СТРУКТУРИ GaAs

$V_{\text{Ga}} V_{\text{As}} + \text{Ga}_i + \text{As}_i \rightarrow V_{\text{As}} \text{As}_i$   
 $[E_c - 0,24]$   $[E_c - 0,29]$   
 $V_{\text{Ga}} \text{Ga}_{\text{As}} + \text{As}_i \rightarrow \text{Ga}_{\text{Ga}} V_{\text{As}} + \text{As}_i \rightarrow V_{\text{As}} \text{As}_i$   
 $[E_c - 0,40]$   $[E_c - 0,45]$

45

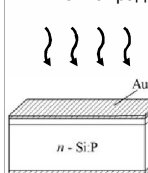
Au/n-GaAs + УЗО

## Ультразвук обробка Au-TiBx-n-n-GaAs

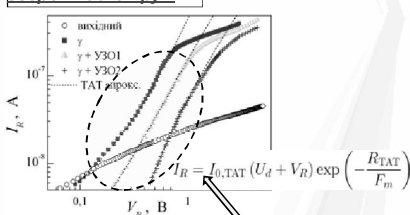


- сглажування неоднорідностей  
потенціального рельєфу контакту
- збільшення концентрації домішок  
у приконтактній області

46

Si-SiO<sub>2</sub> + УЗОАкустовідпал γ-опромінених структур Si-SiO<sub>2</sub>-Auγ-кванти <sup>60</sup>Co $D = 5 \cdot 10^7 \text{ рад}$ 

## зворотний струм



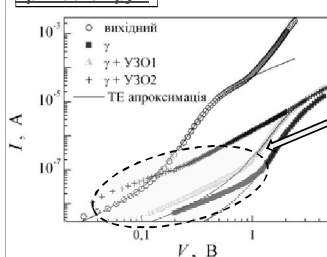
γ-кванти → поява TAT струму внаслідок  
утворення E-центрів  
(вакансій ксню в SiO<sub>2</sub>)

УЗО → відпал радіаційних дефектів  
внаслідок акустоіндукованої дифузії  
атомів ксню

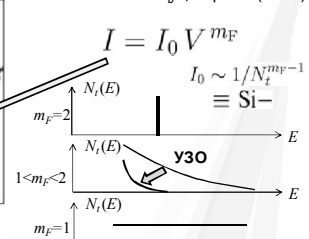
47

Si-SiO<sub>2</sub> + УЗОАкустовідпал γ-опромінених структур Si-SiO<sub>2</sub>-Au

## прямий струм



γ-кванти → поява SCLC струму,  
пов'язаного з P<sub>b</sub>-центрами (≡ Si<sup>-</sup>)



Стан структури	-	+	+	+
γ-опромінення	-	+	+	+
t <sub>уст</sub> , хв	0	0	30	60
m <sub>F</sub>	1,3	1,6	1,8	
I <sub>0</sub>	4,5 · 10 <sup>-8</sup>	1,3 · 10 <sup>-7</sup>	1,5 · 10 <sup>-6</sup>	

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

48



## Висновки

- ✓ Виявлена оборотна акустоіндукована деградація кремнієвих сонячних елементів, як вихідних, так і опромінених нейтронами або  $\gamma$ -квантами. Запропоновано модель акустоактивного комплексного дефекту. Встановлено, що акусто-активними дефектами є кисневімісні 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 Grooton з адаптивною процедурою.
- ✓ Встановлено, що структурах Al-p-n<sup>+</sup>-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 випромінюванням у підсистемі дефектів арсенід галієвих структур та монокристалів карбиду кремнію є збільшення кількості міжвузольних атомів у приповерхневому шарі.
- ✓ Встановлено, що ультразвукова обробка викликає збільшення однорідності параметрів арсенід галієвих діодів Шотткі, створених в єдиному технологічному процесі, та звуження енергетичного спектра радіаційноіндукованих пасток на інтерфейсі системи Si-SiO<sub>2</sub>.

50