



Шафранюк В.П.

## Шафранюк В.П.

Вищий державний навчальний заклад України  
«Буковинський державний медичний університет»,  
Театральна площа, 2, Чернівці, 58000, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛАКСАЦІЇ МЕХАНІЧНИХ НАПРУГ У РЕАЛЬНИХ КРИСТАЛАХ МЕТОДОМ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ДИФРАКЦІЙНОГО МУАРУ

*У роботі наведені результати дослідження полів деформації, які виникають в околі локальних пошкоджень у монокристалах кремнію та германію методом рентгенівського дифракційного муару. З'ясовано, що релаксація полів деформації навколо механічних пошкоджень (відбитків і подряпин, лазерних пошкоджень) відбувається навіть за кімнатної температури, а також за температур відпалу від 473 К до 1073 К. Низькотемпературна релаксація є результатом зміщення атомів через ослаблення хімічних зв'язків, а високотемпературна є результатом руху дислокацій у площинах  $\{111\}$  і напрямках  $\langle 110 \rangle$ .*

**Ключові слова:** подряпини, відбитки індентора, рентгенівський інтерферометр, муарові смуги, термоелемент, термоохолоджувач.

*The paper presents the results of research on the strain fields arising in the vicinity of local damages in silicon and germanium single crystals using X-ray diffraction moire method. It is established that relaxation of strain fields around mechanical damages (indenter marks and scratches, laser induced damages) takes place even at room temperature, as well as at annealing temperatures from 473 K to 1073 K. Low-temperature relaxation results from atomic displacement due to weakening of chemical bonds, whereas high-temperature relaxation results from dislocation motion in  $\{111\}$  planes and  $\langle 110 \rangle$  directions.*

**Key words:** scratches, indenter marks, X-ray interferometer, moire fringes, thermoelement, thermal cooler.

## Вступ

Актуальною проблемою в термоелектриці є отримання якісних та надійних омичних контанків метал – термоелектричний матеріал. Під час створення таких контактів на їх якість та надійність впливає структурна досконалість приповерхневих шарів термоелектричних матеріалів. У більшості випадків структура металевий шар- термоелектричний матеріал містить області локальних механічних напруг, які зв'язані з наявністю міжфазових границь і локальних пошкоджень поверхні матеріалів [1]. Термічна обробка, яка передбачена технологією створення контактів до високотемпературних термоелектричних матеріалів на основі твердих розчинів германій-кремній призводить до релаксації локальних механічних напруг і формування дислокаційних скупчень [2]. Фізичні закономірності процесу релаксацій механічних напруг у планарних контактних структурах дають можливість вирішити проблему

збереження структурної досконалості термоелектричних матеріалів, що є необхідною умовою для створення якісних та надійних контактів у термоелектричних матеріалах. При сучасній мікромініатюризації напівпровідникових пристроїв і термоелектричних модулів потрібно знати, на якій відстані слід розміщувати робочі елементи від скрайбованих рисок, оскільки поля деформацій впливають на електричні параметри даних пристроїв. Дані, які відомі по динамічним властивостям дислокацій у напівпровідниках, одержані в основному, виходячи з вимірювання швидкості руху дислокацій [2] під дією постійної у часі напруги, тоді як утворення дефектів у реальних напівпровідникових структурах виникає у полі змінних напруг. В роботі [2] методами рентгенівської топографії встановлено, що під час скрайбування поля деформацій мають протяжність  $\sim 100 - 150$  мкм.

Отже, дослідження процесу релаксації локальних механічних напруг є актуальним. Метод рентгенівського дифракційного муару (РДМ) є надзвичайно чутливим до незначних деформацій ( $10^{-4} - 10^{-8}$ ) та відносних поворотів ( $0.1 - 0.001''$ ) атомних площин і дозволяє з високою точністю вимірювати абсолютні значення довжини хвиль та періодів кристалічних решіток, визначати показники заломлення та дисперсійні поправки різних речовин, досліджувати неоднорідність термоелектричних твердих розчинів *Ge-Si*, *Bi-Te*, біологічних об'єктів фазовою муаровою топографією, визначати вектор Бюргерса одиничних дислокацій [3 – 8]. За своєю універсальністю метод РДМ значно перевищує усі відомі рентгенівські дифракційні методи. Саме тому у даній роботі використовується метод (РДМ) для вивчення релаксації полів деформацій в реальних кристалах, які виникають навколо локальних пошкоджень (відбитків індентора, подряпин, лазерних ушкоджень – кратерів) у поверхневих шарах кремнію і германію при різних температурах відпалу.

## Методи дослідження

Дослідження проводилось на зразках інтерферометрах, виготовлених з досконалих монокристалів кремнію і германію. Перед нанесенням локальних механічних пошкоджень на вихідну поверхню кристал-аналізатора, інтерферометри попередньо досліджувались. Досліджувані окремі інтерферометри частково містили структурні муарові смуги і були безмуаровими, тобто досконалими. Локальні механічні пошкодження у поверхневих шарах на вихідній поверхні кристал-аналізатора кремнію, германію орієнтації (111), (100), (110) моделювали за допомогою відбитків мікротвердості, подряпин і лазерних пошкоджень. Муарові картини отримувались в  $SuK_{\alpha}$  - випромінюванні з допомогою скануючої камери вздовж вектора дифракції. Відбитки й подряпини наносились алмазним індентором на мікротвердомірі на вихідну поверхню кристал-аналізатора інтерферометра в різних кристалографічних напрямках при різних навантаженнях. Лазерне пошкодження поверхні, яке проявлялося у вигляді кратера, проводилося за допомогою неодимового лазера на поверхні аналізатора (111).

## Результати дослідження

Під час нанесення подряпини варто розрізняти два процеси: вдавлювання і рух індентора по поверхні кристала. В околі подряпини виникає зона пластично-деформованого матеріалу, пронизаного мікротріщинами і виколками, а також зона пружних напруг, зв'язаних з наклепом. Величина деформованої області в околі відбитків мікроіндентора і подряпин може бути визначена з муарових картин [5].

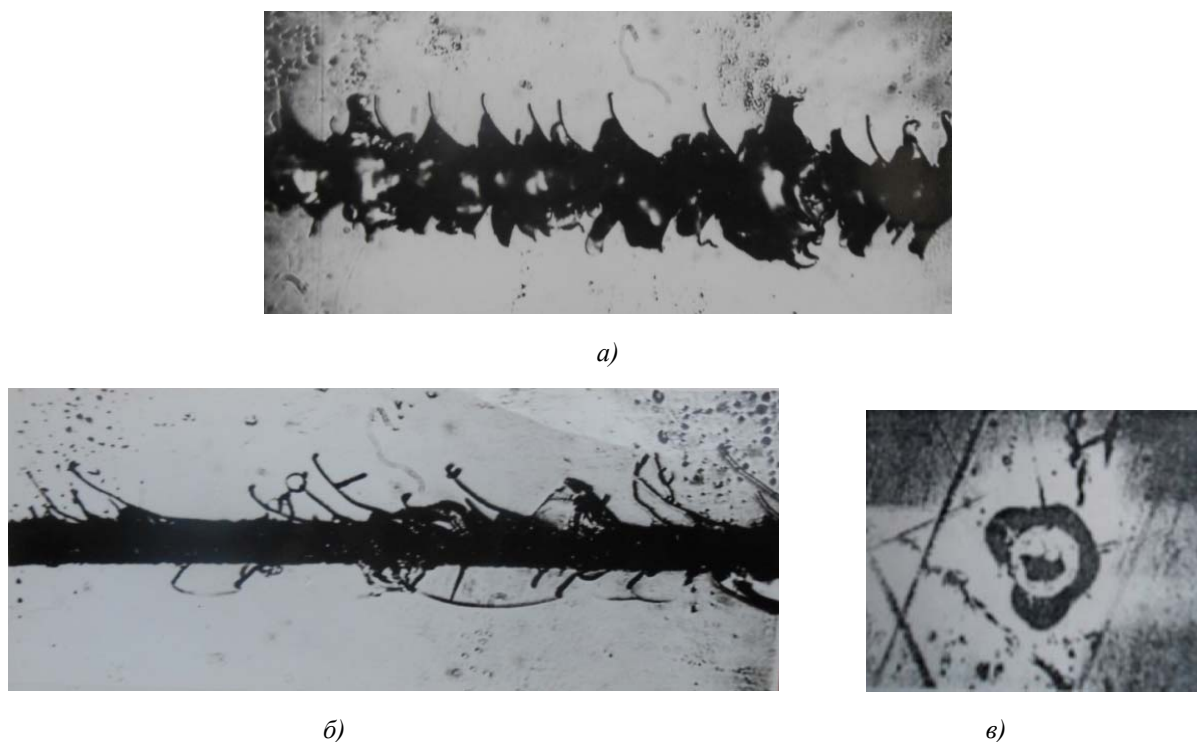
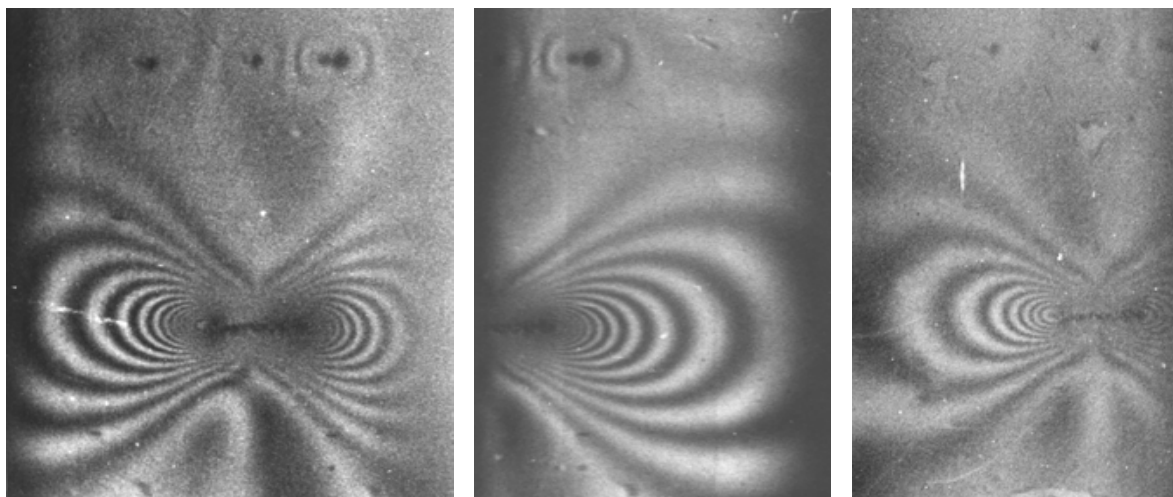


Рис. 1. Вид подряпин в різних кристалографічних напрямках на поверхні аналізатора:  
 а) в напрямі  $[110]$ , б) в напрямі  $[11\bar{2}]$ , в) зображення лазерного пошкодження на поверхні  $(111)$ .

На рис. 2 зображена муарова картина від подряпини і відбитків індентора при різних навантаженнях 15, 20, 25 г, нанесених на вихідну поверхню кристал-аналізатора досконалого кремнієвого інтерферометра. Напрямок подряпини збігається з напрямком вектора дифракції  $g$  при навантаженні 25 г та довжиною 2 мм. Муарові картини були одержані за допомогою скануючої камери у  $CuK_{\alpha}$  - випромінюванні уздовж вектора дифракції. Муарова картина є симетричною відносно центру подряпини, розділеної нульовою муаровою смугою, яка відповідає результуючому деформаційному полю від подряпини. Від нульової смуги ліворуч та праворуч спостерігається 12 – 14 муарових смуг, відстань між якими при наближенні до країв подряпини зменшується, що дає можливість трактувати про зростання деформації. Відомо, що муарова смуга представляє собою геометричне місце точок однакових зміщень в напрямку вектора дифракції, оскільки, на відстані рівній періоду муарової смуги, величина зміщення рівна міжплосинній відстані досконалої решітки. Від даної подряпини було теж одержана інтерферограма при повороті інтерферометра на 90 градусів з використанням відбивання  $(022)$ , коли вектор дифракції перпендикулярний до цієї подряпини. Зображення подряпини на муаровій картині являє собою переривчасту світлу лінію, яка обмежена з двох сторін темним ореолом, а дифракційний контраст від подряпини (рис. 2), коли вектор дифракції паралельний їй, складається з чорно-білих пелюстків. Муарові смуги огинають подряпини.

На муарових картинах (рис. 2) одночасно спостерігаються дифракційні зображення подряпини і відбитків, локалізовані біля них і далекодіючі поля деформації у вигляді муарових смуг. З муарових картин видно, що поля пружної деформації відбитків поширюються на великі відстані, які в багато разів більші за реальні їхні розміри  $d$ . Визначені розміри областей контрасту  $D$  вздовж вектора дифракції дають можливість стверджувати про їхню асиметричність. Лінія асиметрії дифракційного контрасту відносно площин відбивання збігається з лінією нульового контрасту, перпендикулярна до вектора дифракції. Зменшуючи

навантаження і розмір відбитку, вдалося показати, що відношення величини контрасту до розміру відбитка зростає і це, швидше за все, пояснюється особливостями релаксації напруг у поверхневих шарах кремнію. Зменшення  $D/d$  при збільшенні навантаження і зростанні розмірів відбитку можна пояснити тим, що у монокристалі кремнію під індентором настає межа крихкості руйнування і у процесі виникнення мікротріщин проходить скидання залишкових напруг.



а) б) в)

Рис. 2. Муарові картини подряпини і відбитків, одержаних від різних областей аналізатора інтерферометра в  $\text{SiK}_\alpha$ - випромінюванні при кімнатній температурі (а, б, в) після відпалу при температурі 673 К. Відбивання  $(0\bar{2}2)$ ,  $\times 10$ .

На рис. 2. в зображена муарова картина при відпалі інтерферометра при температурі 673 К на повітрі. З муарових картин (рис. 2.) видно, що відбувається часткова релаксація напруг в околі відбитків індентора і подряпин.

На дифракційних муарових картинах розрізняють три характерних залежності періоду муарових смуг від величини деформації:  $\Lambda_d = \frac{d_0 d}{|d - d_0|} = \frac{1}{\Delta g}$  – дилатаційний муар, ротаційний

муар –  $\Lambda_r = \frac{1}{\Delta g_r} = \frac{d_0}{\theta}$ , змішаний муар –  $\frac{1}{\Lambda} = \sqrt{\left(\frac{1}{\Lambda_d}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Lambda_r}\right)^2}$ . Вимірюючи періоди між муаровими смугами і їх нахил відносно відбиваючих площин за допомогою співвідношень:

$$d = \Lambda \left[ 1 + \left( \frac{\Lambda}{d_0} \right)^2 + 2 \frac{\Lambda}{d_0} \cos \phi \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \theta = \frac{\sin \phi}{\frac{\Lambda}{d_0} + \cos \phi} \quad (1)$$

розраховані відносні деформації  $\frac{\Delta d}{d_0}$  і повороти атомних площин  $\theta$  в кристал-аналізаторі.

Відносні деформації змінюються від  $2 \times 10^{-6}$  до  $5 \times 10^{-7}$ , а повороти атомних площин від 0.0025 до 0.05 кутових секунди.

На рис. 3 представлені криві залежностей відносної деформації від віддалі від краю подряпини для різних температур відпалу. Аналіз проведених досліджень показує, що процеси релаксації напруги у кристалі кремнію при температурах відпалу від 293 К до 873 К проходять за різними механізмами: 1) початкова релаксація напруг у результаті зміщення атомів із-за

ослаблення хімічних зв'язків при підвищенні температури; 2) високотемпературна релаксація проходить за рахунок руху дислокацій по площинах  $\{111\}$  і напрямках  $\langle 110 \rangle$  [5].

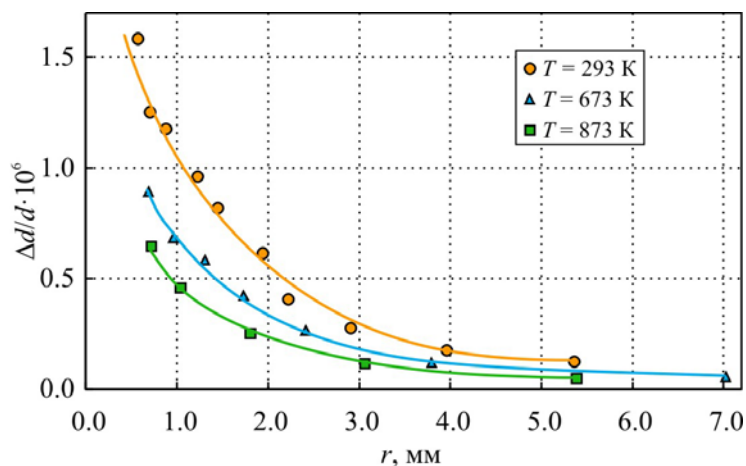
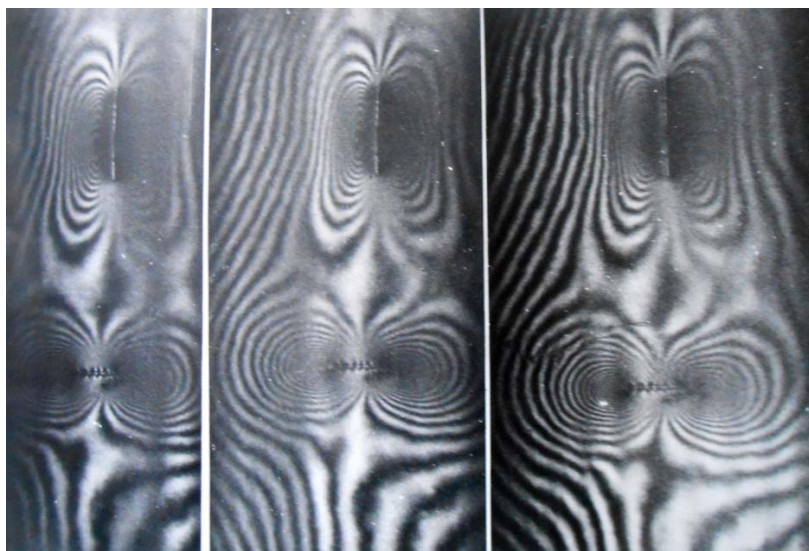


Рис. 3. Криві залежностей відносної деформації від краю подряпини (рис. 2).

У роботі теж проведені дослідження, як зображаються подряпини в структурному дилатаційному муарі, які нанесені в різних напрямках до вектора дифракції (рис. 4). Дані інтерферограми (рис. 4) одержані від кремнієвого інтерферометра, на вихідну поверхню якого нанесено дві подряпини 1.5 мм і 2 мм відповідно паралельно і перпендикулярно до вектора дифракції  $g_{220}$  при навантаженні 40 г.



а)

б)

в)

Рис. 4. Муарові картини подряпин нанесених на поверхню (111) аналізатора Si в напрямках  $[110]$  та  $[\bar{1}\bar{1}2]$  при навантаженні 0.4 Н: а – 1 доба після нанесення подряпини; б – 5 діб; в – 12 діб,  $\times 8$ .

Структурні муарові смуги розсуваються полем пружних деформацій, які виникли в області подряпин. На муарових картинах (рис. 4) чітко видна структура дифракційного контрасту подряпин. Одержані інтерферограми в різний час (1, 5, 12 діб, рис. 4), дали можливість виявити, що навіть при кімнатній температурі відбувається релаксація напруг

навколо подряпин, які проявляються у зміні контрасту, розщепленні муарових смуг і зміні періоду між ними. Таку зміну іншими методами зафіксувати практично неможливо, оскільки зміна деформованої області кристала в околі подряпини пройшла на міжплощинну відстань ( $1.920752 \text{ \AA}$ ).

Кількість додаткових муарових смуг навколо подряпини залежить від навантаження на індентор (рис. 4, 5). Структурні муарові смуги в центрі подряпини розділені нульовою темною муаровою смугою, відносно якої муарова картина є частково симетричною (рис. 5).

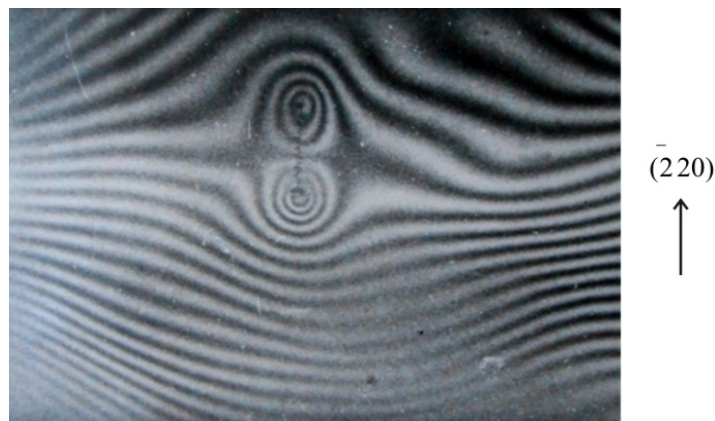


Рис. 5. Зображення подряпини в структурному муарі, нанесеної на поверхню аналізатора  $(111)$  у напрямку  $[\bar{1}10]$  при навантаженні  $0.15 \text{ Н}$ . Відбивання  $(\bar{2}20)$ ,  $\times 8$ .

Необхідно зазначити, що на інтерферограмах одночасно спостерігається дифракційне зображення подряпини, яке локалізоване поблизу неї і деформаційних полів, які проявляються у вигляді муарових смуг на значних відстанях. Розміри областей дифракційного і муарового контрастів  $L$  в десятки і сотні разів перевищують геометричні розміри подряпин. При збільшенні ширини подряпини відношення  $L/d$  ( $d$  – ширина подряпини) зменшується. Це зв'язано з тим, що під дією великих навантажень настає границя крихкого руйнування, внаслідок чого виникають тріщини і відбувається часткова релаксація пружних напруг.

У даній роботі теж аналізувалось, як зображується подряпина в залежності від її глибини у дифракційній муаровій картині. Для цього використовувався інтерферометр, який містив ротаційний муар, відповідно якому відносний поворот атомних площин відповідав  $0.025$  сек. Аналізатор інтерферометра встановлювався під кутом  $30$  хв. в площині протягування, внаслідок чого індентор заглиблювався у поверхню.

На рис. 6 представлені муарові картини з двома подряпинами, нанесеними на площину аналізатора  $(110)$  в напрямку  $[001]$ . Вектор дифракції  $g(\bar{2}20)$  перпендикулярний до слідів подряпин. Сформоване сумарне поле пружних деформацій від двох подряпин розміщене по одну сторону від них.

Сім ближчих муарових смуг до подряпини з досконалої частини кристала згинаються і закінчуються біля подряпини. Сім наступних муарових смуг починаються на подряпині згинаються і через певний проміжок закінчуються на ній, що свідчить про знакоперемінний характер згину атомних площин. При незначних згинах аналізатора інтерферометра місцеположення муарових смуг змінюється, відбувається зміна контрасту муарових смуг, але структура поля деформацій не змінюється (рис. 6б).

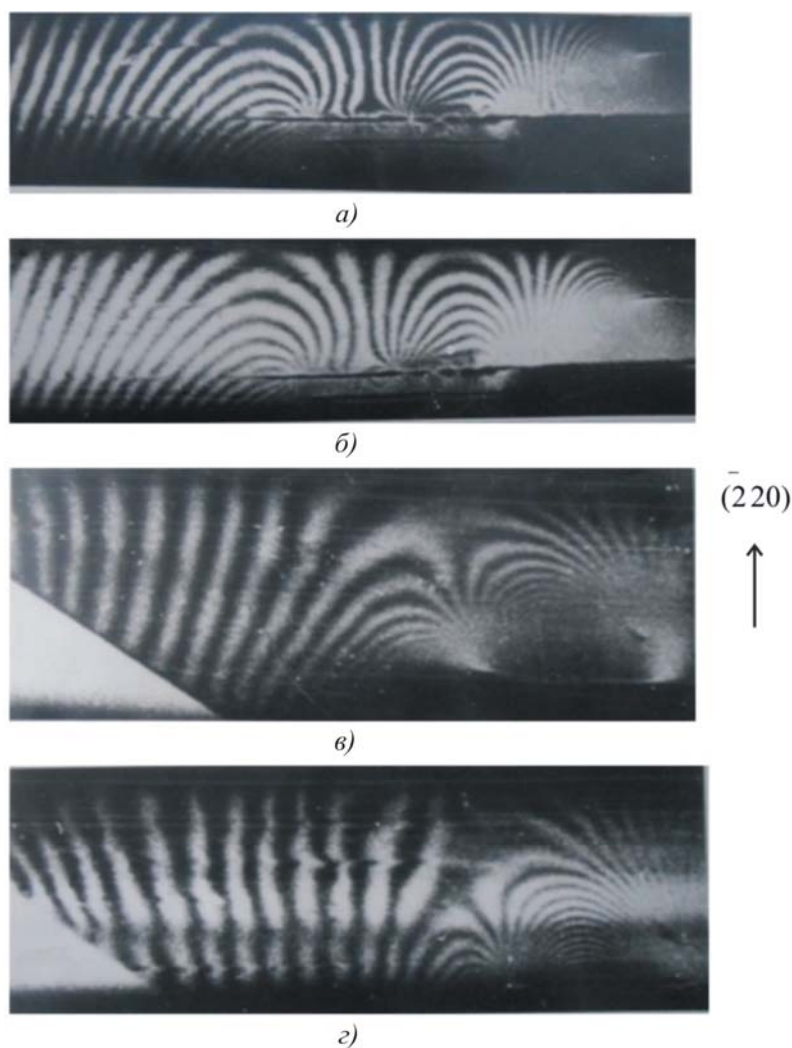


Рис. 6. Інтерферограми системи подряпин: а, б – подряпини нанесені на поверхню (110) аналізатора Si у напрямку [001]; в, з – релаксація напруг після відлому пластини вздовж лінії подряпини. Відбивання  $(\bar{2}20)$ ,  $\times 10$ .

У даному випадку область деформацій, визначена з муарових картин (рис. 6), у напрямку [110] досягає 1 мм. Після відлому пластини аналізатора пластини вздовж лінії подряпини, зона деформаційної області зменшилась до 0.45 мм, оскільки відбулась релаксація напруг, що є наслідком зміни муарових картин (рис. 6в, з). Зміщення деформованої області кристал-аналізатора відбулось на міжплощинну відстань, оскільки контраст муарової смуги змінився на протилежний. На муаровій картині (рис. 6з) у роздвоєній муаровій смугі видно 12 додаткових смуг, що свідчить про наявність дислокацій, оскільки кожна додаткова смуга відповідає дислокації.

Від даної системи подряпин була також знята муарова картина з використанням відбивання (004), коли вектор дифракції був паралельним до ліній подряпин (рис. 7).

Кількість додаткових смуг біля подряпини на одиницю довжини є велика. У верхній частині інтерферограми видно зображення дислокації, яка зображається у вигляді двох додаткових напівсмуг. Кількість додаткових смуг у муаровій картині  $N$  визначається проекцією вектора Бюргерса на нормаль до відбиваючих площин  $N = (qb)$ , для повних дислокацій  $N$  – ціле число і дислокація у муаровій картині проявляється у вигляді одної або декількох додаткових смуг.



Рис. 7. Інтерферограма подряпин, відбивання (004),  $\times 10$ .

Особливий інтерес представляє дослідження полів деформацій, які виникають в околі перетину двох подряпин. Такий спосіб скрайбування широко використовується при виготовленні мікросхем. Вище було продемонстровано, що поля деформацій суттєво залежать від орієнтації ліній подряпин відносно кристалографічних напрямків. Для даного випадку подряпини наносились на вихідну поверхню (111) аналізатора досконалого германієвого інтерферометра при навантаженні 0.15 Н в напрямках  $[110]$  і  $[\bar{1}\bar{1}2]$ .

Як видно із рис. 8, характер і величина деформацій атомних площин залежить від відстані до подряпини і її орієнтації відносно вектора дифракції. Результуюча муарова картина від двох подряпин, які перетинаються, представляє собою систему муарових смуг, які огинають подряпину, паралельну до вектора дифракції, і закінчуються на подряпині, перпендикулярній до нього.

На рис. 8б представлені криві залежності відносних деформацій атомних площин від відстані до подряпини в різних напрямках. Залежність відносної деформації атомних площин від відстані від подряпини відповідає функції  $-1/r$  ( $r$  – відстань від краю подряпини), що свідчить про дислокаційну структуру. Структура полів зміщень практично не змінюється при наявності в інтерферометрі дилатаційного, ротаційного чи фазового муарів.

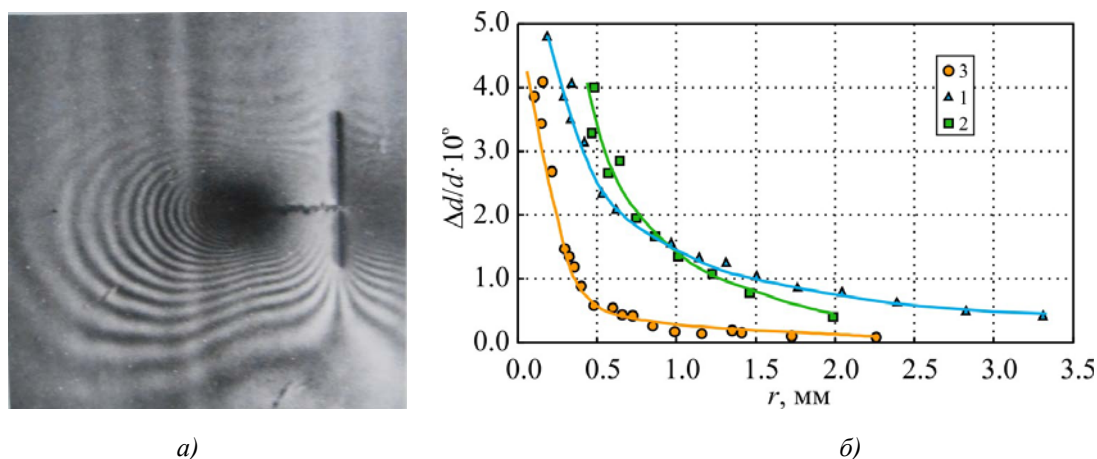


Рис. 8. а – інтерферограма подряпин, які перетинаються нанесених у напрямках  $[\bar{1}10]$  і  $[\bar{1}\bar{1}2]$ , відбивання  $(\bar{2}20)$ ,  $\times 10$ , б – залежність відносної деформації атомних площин від відстані від краю подряпини проведеної у напрямку  $[\bar{1}10]$ : 1 –  $[\bar{1}10]$ , 2 –  $[\bar{1}\bar{1}2]$ , 3 –  $[\bar{1}10] \wedge [\bar{1}\bar{1}2] = 45^\circ$ .

У роботі теж розглянуто, як формується муарова картина від подряпин нанесених під різними кутами до вектора дифракції (рис. 9) у структурному муарі. Результуюче поле



деформацій проявляється у додаткових муарових смугах, які починаються на одній подряпині, закінчуються на другій, таких додаткових смуг є майже 14.



Рис. 9. Зображення подряпин, нанесених під кутом до вектора дифракції  $g_{220}^-$ : а) при кімнатній температурі; б) після відпалу 1023 К,  $\times 10$ .

Відпал інтерферометра при температурі 1023 К призводить до релаксації напруг в області подряпин, внаслідок чого кількість муарових смуг зменшилась до трьох, а відносні деформації атомних площин зменшились на порядок. Високотемпературна релаксація напруг навколо подряпин проходить внаслідок руху дислокацій у площинах  $\{111\}$  і напрямках  $\langle 110 \rangle$ .

Необхідно відзначити, що у роботі розглядалось питання, як на формування і видимість муарових картин впливає створений в інтерферометрі температурний градієнт більший і менший нуля. У першому випадку інтерферометр нагрівався до температури 310 К за допомогою термоелемента, а у другому охолоджувався за допомогою термоохолоджувача до температури 263 К. Якісних і контрастних муарових картин не вдалось отримати від різних подряпин, оскільки взаємодіючі хвилі в аналізаторі інтерферометра не повністю будуть когерентними, внаслідок чого відбувається залежність співвідношень між амплітудами хвиль та їх фазами у перших двох компонентах інтерферометра ( $S$  і  $M$ ).

Важливим аспектом дослідження є визначення полів деформацій, які виникають при взаємодії сфокусованого лазерного променя на поверхню монокристалів кремнію. Оскільки скрайбування лазерним променем широко використовується у напівпровідниковій промисловості при розламуванні пластин на елементи [1]. При взаємодії лазерного променя на поверхню кремнію утворюються кратери тільки тоді, коли інтенсивність випромінювання перевищує критичну величину і в окремих випадках вони мають форму шестикутника (рис. 1в) на площині (111).

На рис. 10 представлені інтерферограми від лазерного пошкодження, які є симетричні відносно напрямку  $[11\bar{2}]$ . З муарових картин видно, що поля пружних деформацій поширюються на великі відстані, які в багато разів перевищують геометричні розміри пошкоджень і дифракційний контраст.

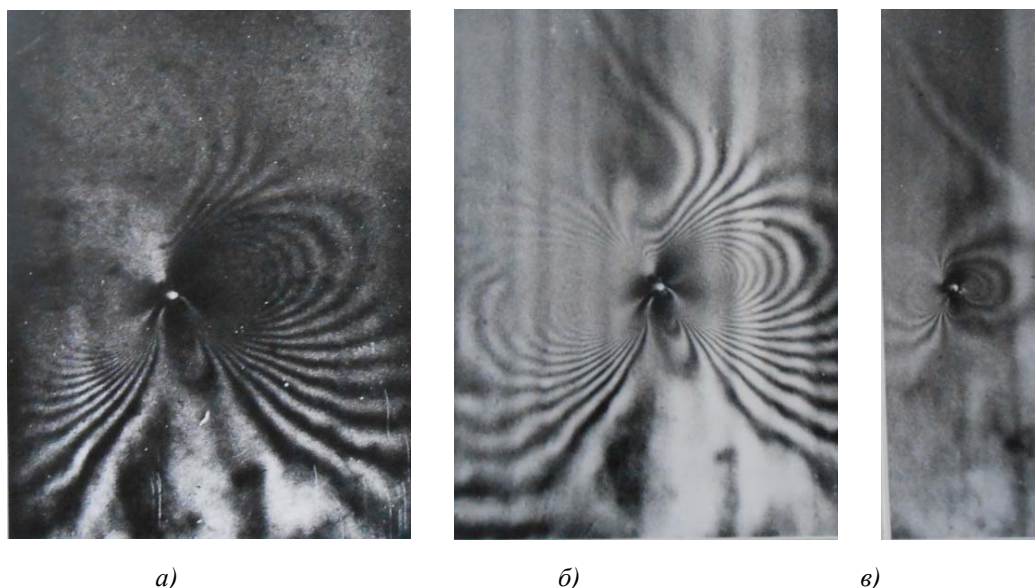


Рис. 10. Муарове зображення лазерного ушкодження в  $\text{SiK}_\alpha$ - випромінюванні з використанням відбивання ( $\bar{2}20$ ): а – після лазерного пошкодження; б – після накладеного градієнта температури; в – після відпалу,  $\times 10$ .

Накладаючи температурний градієнт  $dT/du = 2 \text{ K/cm}$  на аналізатор інтерферометра за допомогою термоелемента вздовж атомних площин ( $\bar{1}10$ ) [7], вдалося показати, що навіть при кімнатній температурі відбувається релаксація напруг (рис. 10б). Такий незначний температурний градієнт в аналізаторі інтерферометра призводить до релаксації напруг, про що свідчить підвищення контрастності муарових смуг (рис. 10б) і високої стабільності роботи термоохолоджувача (термоелемента), оскільки експозиція муарових картин тривала майже 6 год. Використовуючи співвідношення (1), були розраховані відносні деформації  $\Delta d/d_0$  і повороти атомних площин  $\theta$  в кристал-аналізаторі в околі лазерного ушкодження. При відпалі інтерферометра при різних температурах вдалося з'ясувати процеси релаксації напруг в області лазерного пошкодження. При температурі відпалу 1273 К відбувається значне зменшення деформації у кристалі, яке чітко видно з інтерферограми (рис. 10в). Розрахунки показали, що відносні деформації зменшуються приблизно в 16 разів, а структура характеру поля деформації залишається без змін. Контроль і дослідження структурної досконалості і розподілу полів деформації в околі локальних пошкоджень дають можливість контролювати енергію лазерного випромінювання і коригувати його технологічні режими.

Метод РДМ дає можливість з високою точністю визначати далекодіючі поля зміщень і деформацій атомних площин кристала на значних відстанях від системи подряпин і лазерних пошкоджень, тим самим відтворити реальну функцію локальних розорієнтацій деформованої області кристала, яку можна використати для теоретичного розрахунку з використанням рівнянь Такагі муарових картин [8].

## Висновки

Запропоновано новий метод визначення розподілу полів деформацій в околі локальних пошкоджень у монокристалах кремнію і германію з використанням рентгенівського дифракційного муару. З'ясовано, що релаксація полів деформації навколо механічних пошкоджень (відбитків, подряпин і лазерних кратерів) відбувається навіть за кімнатної

температури, а також за температур відпалу від 473 К до 1273 К. Низькотемпературна релаксація є результатом зміщення атомів через ослаблення хімічних зв'язків, а високотемпературна є результатом руху дислокацій у площинах  $\{111\}$  і напрямках  $\langle 110 \rangle$ . Знання деформованої області від скрайбованих рисок дає можливість правильно проектувати інтегральні схеми, розташовуючи їхні елементи не ближче 150 мкм від краю подряпини.

### Література

1. Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. Москва 1982. 240 с.
2. Горелик С.С., Литвинов Ю.М., Приходько А.В. Релаксация локальных механических напряжений в приповерхностных слоях кремния. *Поверхность*. 1985. № 5. С.80 – 83.
3. Раранский Н.Д., Шафранюк В.П., Фодчук И.М. Рентгенинтерферометрическое изображение полей деформации вокруг дислокационных скоплений. *Металлофизика*. 1985. 7. №5. С. 63 – 71.
4. Раранский Н.Д., Шафранюк В.П. Дефекты границ сопряжений и релаксация напряжений эпитаксиальных систем *Si-Si, Ge-Si, GaP-Si*. *УФЖ*. 1985. 30. № 1. С. 127 – 132.
5. Шафранюк В.П. Можливості методу рентгенівської дифракційної інтерферометрії у вивченні релаксації локальних механічних напруг в приповерхневих шарах монокристалів *Науковий вісник ЧНУ. Фізика*. 1998. Вип. 32. С.122 – 127.
6. Raransky N.D., Struk Ja. M., Fodchuk I.M., 6. Shafranyuk V.P., Raransky A.N. Applied possibilities of a X-Ray diffraction interferometry. *Proc.SPIE*. Bellingham 1995. 2647. P. 457 – 467.
7. Shafranyuk V.P. Determination of structural changes and temperature distribution within crystals *Thermoelectricity*. 1998. №3. С. 89 – 94.
8. Фодчук І.М., Раранський М.Д., Струк Я.М., Фесів І.В. та ін. Муарові зображення дефектів у рентгенівській трикристальній інтерферометрії. *Науковий вісник ЧНУ. Фізика*. 2000. Вип. 92. С. 14 – 19.

Надійшла до редакції 04.11.2016