

# ЗОНДУВАННЯ РІЗНОМОДИФІКОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ Ge(111) ПОВІЛЬНИМИ ЕЛЕКТРОНАМИ

**Т.Ю. Попик, В.М. Фейер**

Інститут електронної фізики НАН України,  
вул. Університетська 21, Ужгород, 88000  
e-mail: vfeyer@yahoo.com

Методом зворотного розсіювання електронів низьких енергій (0-6 eV) з використанням гіпоциклоїдального електронного спектрометра з високим енергетичним розділенням (~70 meV) досліджено процеси електронного збудження поверхневих та об'ємних електронних станів для різномодифікованих (шліфованої, полірованої та травленої) поверхонь Ge(111). Досліджено енергетичні залежності інтенсивності пружного зворотного розсіювання та спектри енергетичних втрат. Встановлено, що спектри зворотного розсіювання чутливі до стану поверхні, а їх тонка структура обумовлена збудженням поверхневих і об'ємних електронних станів.

## Вступ

Методи електронної спектроскопії знайшли широке застосування для вивчення поверхневих властивостей твердих тіл [1-4]. Зокрема, Оже-спектроскопія дозволяє визначити хімічний склад поверхні, дифракція електронів – кристалічну структуру, а для вивчення електронної енергетичної структури твердого тіла найбільш широко використовуються методи ультрафіолетової і рентгенівської електронної спектроскопії, електрон-фотонної спектроскопії, спектроскопії характеристичних втрат енергії електронів та спектроскопія повного струму [1-4]. Як зонд у більшості електронноспектроскопічних методів використовуються електрони з енергією >100 eV. Повільні електрони (<10 eV) практично не використовувалися, хоча такі електрони, як зондуєчий пучок, мають явні переваги над більш високоенергетичними [1,2]. Але використання повільних електронів для зондування поверхні твердих тіл пов'язане з труднощами отримання достатньо інтенсивних і добре колімованих електронних пучків з високою однорідністю розподілу їх за енергіями.

Одним із методів, у якому як зонд використовуються повільні моноенергетичні електрони, є метод зворотного розсіювання електронів низьких енергій (ЗРЕНЕ). Він апробований на широкому колі матеріалів: металів, елементарних та складних напівпровідників [5-7]. Як показано раніше у роботах [8-11] при дослідженні різномодифікованих поверхонь кремнію, різних граней германію, свіжонапилених та окислених плівок магнію, спектри пружного і непружного ЗРЕНЕ чутливі до модифікації, кристалічної орієнтації і чистоти досліджуваних поверхонь твердих тіл.

При дослідженні методом ЗРЕНЕ дзеркально відполірованої та аморфізованої лазерним випромінюванням поверхонь *p*-Si(100) встановлено, що коефіцієнт пружного відбивання повільних електронів і характер його поведінки дуже чутливі до обробки поверхні [8]. Так, максимальний коефіцієнт пружного відбивання на 180° для дзеркально відполірованої поверхні *p*-Si(100) становить ~22%, а для розупорядкованої, аморфізованої поверхні – лише ~10%. На енергетичних залежностях інтенсивності пружного та непружного розсіювання елек-

тронів для аморфізованої поверхні кремнію практично відсутня тонка структура. Вона чітко проявляється на цих залежностях при розсіюванні від дзеркально відполірованої поверхні *p*-Si(100) [8].

Вплив кристалічної орієнтації площини поверхні зразка на процеси пружного і непружного розсіювання електронів досліджено для дзеркально відполірованих поверхонь (100), (110) і (111) германію [9, 10]. Було встановлено, що реконструкція поверхні Ge(100) відбувається такими ж блоками, як і реконструкція поверхонь Ge(111) і Ge(110). Виявлено нові поверхневі електронні стани з енергіями ~0.18 і ~0.25 eV у забороненій зоні для досліджених поверхонь Ge(111), Ge(110) і Ge(100) [9,10].

У роботах [9,11] методом ЗРЕНЕ вивчено прояв еволюції електронних станів у спектрах пружного і непружного зворотного розсіювання повільних моноенергетичних електронів у процесі окислення поверхонь Ge і Mg. Це дало можливість розділити поверхневі і об'ємні електронні стани. Було встановлено, що окислення атомно-чистих поверхонь Ge і Mg в атмосфері залишкових газів при  $P \sim 10^{-7}$  Па змінює інтенсивність і згладжує тонку структуру спектрів ЗРЕНЕ.

Метою даної роботи було детальне вивчення особливостей у спектрах пружного і непружного ЗРЕНЕ при взаємодії повільних моноенергетичних електронів з по-різному обробленими (механічне полірування, травлення та шліфування) поверхнями Ge(111).

### Експеримент

Експерименти проводились на надвисоковакуумній ( $P \sim 10^{-7}$  Па) установці з безмасляною відкачкою, основним вузлом якої є гіпоциклоїдальний електронний спектрометр з такими характеристиками в умовах даного експерименту: енергія електронів 0-6 eV, струм первинного пучка  $\sim 10^{-8}$  А, діаметр пучка  $\sim 0.5$  мм, повна ширина енергетичного розподілу електронів у первинному пучку на

напіввисоті максимуму розподілу (FWHM)  $\sim 40-50$  меВ, енергетичне розділення аналізатора (FWHM)  $\sim 70$  меВ. Детально устатковку, принцип роботи гіпоциклоїдального електронного спектрометра та методик досліджень описано у [12]. Дослідження спектрів пружного і непружного ЗРЕНЕ проводилось у автоматичному режимі за допомогою розробленої програми на базі IBM PC. Сигнал нагромаджувався протягом 5-10 с, усереднювався та записувався у базу даних.

Експерименти проводились на зорієнтованих з точністю до  $1^\circ$  поверхнях (111) монокристалічного германію. Зразки орієнтувались за допомогою дифрактометра за характерними рефlekсами з використанням  $Cu K_\alpha$  - випромінювання. Для дослідження було вибрано три типи поверхонь германію. Поверхня першого зразка була шліфованою, поверхня другого – дзеркально відполірована механічно, поверхня третього – спочатку дзеркально полірована механічно, а потім протравлена поліруючим розчином  $5HNO_3 + 3HF + 3CH_3COOH$  протягом 2 хв [13]. Подальша очистка поверхні проводилась прогріванням до 1000-1100 К у вакуумі  $10^{-7}$  Па протягом 5 годин бомбардуванням зразка з тильного боку високоенергетичними електронами ( $U \sim 500$  В,  $I \sim 35$  мА). Контроль чистоти поверхні здійснювався за наявністю чіткої та незмінної тонкої структури у спектрах зворотного розсіювання, характерної для даної поверхні.

### Експериментальні результати та їх обговорення

У даній роботі представлено результати дослідження енергетичних залежностей інтенсивності пружного розсіювання та спектри енергетичних втрат при зворотному розсіюванні повільних (0-6 eV) моноенергетичних електронів досліджуваними поверхнями Ge(111). Калібрування енергетичної шкали для пружного розсіювання електронів проводилося за зсувом вольт-амперної характеристики

струму на зразок. За нуль шкали приймався максимум функції розподілу падаючого електронного пучка за енергією. При дослідженні спектрів енергетичних втрат калібрування шкали здійснювалось за енергетичним положенням піку пружно розсіяних електронів назад. Точність калібрування становила  $\pm 40\text{--}50$  меВ. Достовірність одержаних результатів забезпечувалась прецизійною апаратурою та високою відтворюваністю спектрів у багатьох серіях експериментів.

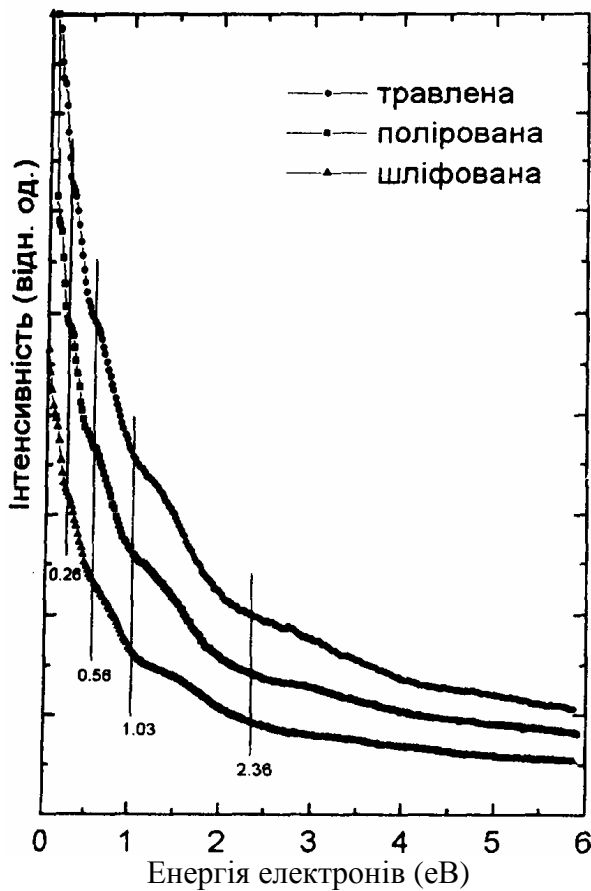


Рис. 1. Енергетичні залежності інтенсивності пружного розсіювання для досліджуваних поверхонь Ge(111)

Енергетичні залежності інтенсивності пружного розсіювання електронів різномодифікованими поверхнями Ge(111) наведено на рис. 1. Як видно з рисунку, для цих енергетичних залежностей характерний різкий спад інтенсивності з ростом енергії, на який накладається тонка структура. Максимальна інтенсивність пружного відбивання спостерігається для про-

травленої поліруючим розчином дзеркальної поверхні Ge(111), а мінімальна - для шліфованої поверхні. Це обумовлено зростанням дифузного розсіювання при порушенні верхнього шару, оскільки висота та концентрація мікронерівностей є максимальною для шліфованої поверхні.

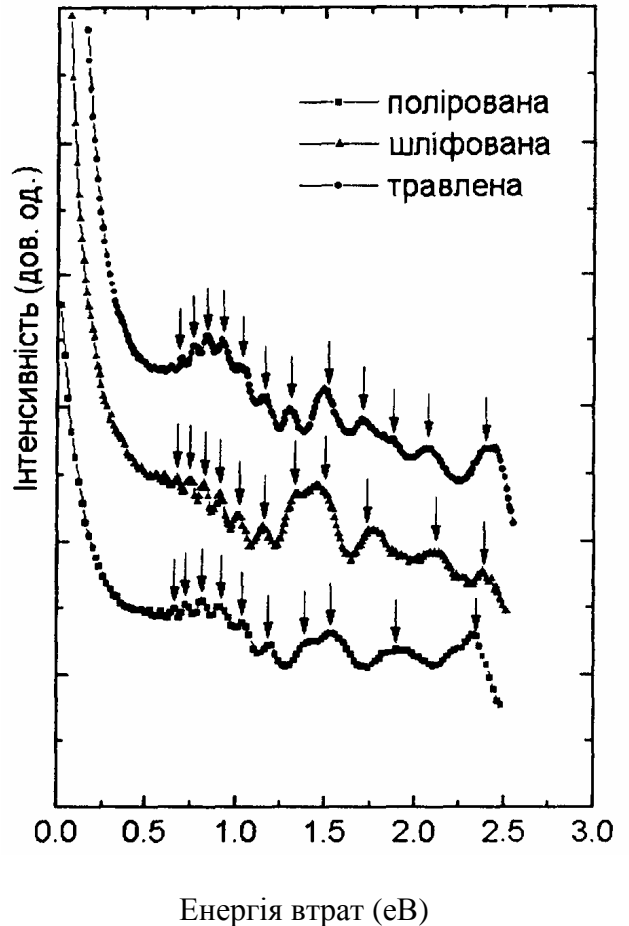


Рис. 2. Спектри енергетичних втрат при  $E_p = 2.5$  eV для досліджуваних поверхонь Ge(111).

На рис. 2 наведено спектри втрат при енергії падаючих електронів ( $E_p$ ) 2.5 eV для різномодифікованих поверхонь Ge(111). Як видно з рис. 2, спектри енергетичних втрат виявилися більш інформативними, ніж енергетичні залежності пружного розсіювання (рис. 1). Пояснити однозначно цей факт поки що не вдається можливим, оскільки ще не розроблено теоретичних основ запропонованої методики дослідження електронної енергетичної структури твердих тіл.

Відомо [1], що при деякій чітко визначеній енергії первинних електронів відбувається різке збільшення імовірності збудження одночастинкових і колективних енергетичних станів твердого тіла. Це призводить до зменшення інтенсивності потоку пружно розсіяних електронів і на енергетичних залежностях інтенсивності пружного ЗРЕНЕ спостерігається мінімум. Відповідно, на спектрах втрат при цій енергії спостерігається максимум. Це підтверджують одержані нами результати.

Характерною особливістю атомно-чистої поверхні германію є те, що для неї характерна наявність поверхневих станів у валентній зоні, забороненій зоні та поблизу рівня Фермі  $E_F$ , який для атомно-чистої поверхні германію фактично співпадає з вершиною валентної зони [1,4,9,10,14-17].

Як видно з рис. 2, енергетичне положення більшості особливостей на спектрах втрат, в межах похибки експерименту ( $\pm 70$  меВ), співпадає для всіх трьох досліджуваних поверхонь. Однак, слід відзначити різницю у відносній інтенсивності деяких максимумів на спектрах, наприклад, особливості з енергіями  $\sim 1.5$  і  $\sim 2.37$  еВ. Особливо цікавим є той факт, що особливість з енергією  $\sim 1.88$  еВ чітко проявляється у вигляді максимуму для полірованої поверхні Ge(111), у вигляді плеча для травленої поверхні і не проявляється взагалі для шліфованої поверхні германію. Також слід відзначити відмінність у ході кривих в області енергії 0.5-1.25 еВ. Це може свідчити про те, що набір поверхневих та об'ємних електронних станів є однаковим для всіх досліджуваних поверхонь, а відмінною є густина поверхневих електронних станів. Тому особливості, які обумовлені збудженням поверхневих електронних станів, проявляються по-різному для різних поверхонь германію.

Особливості, які спостерігаються у спектрах ЗРЕНЕ (рис. 1,2) для різнооброблених поверхонь Ge(111), як нами було встановлено раніше при дослідженні

поверхонь *p*-Si(100) [8], Ge(111), Ge(110) і Ge(100) [9,10], Mg [6,11], обумовлені збудженням поверхневих та об'ємних електронних станів. Зокрема, особливості з енергіями  $\sim 0.73$ ,  $0.81$ ,  $1.31$  і  $2.08$  еВ обумовлені електронними переходами між максимумами густини станів у валентній зоні і зоні провідності привведеної зони Бріллюена в об'ємі  $\Gamma_{25}^1 - L_1$  (теорія [18]  $\sim 0.7$  еВ),  $\Gamma_{25}^1 - \Gamma_2^1$  (теорія [18]  $\sim 0.8$  еВ),  $\Gamma_{25}^1 - X_1$  (теорія [18]  $\sim 1.3$  еВ) і  $L_3^1 - L_1$  (теорія [18]  $\sim 2.0$  еВ), відповідно. Особливості з енергіями  $0.83$ ,  $1.1$  і  $1.4$  еВ обумовлені збудженням електронних переходів з заповнених поверхневих електронних станів, розташованих нижче рівня Фермі, на пусті поверхневі електронні стани, розташовані вище  $E_F$  [9,10, 14-17]. Деякі особливості на спектрах можуть бути обумовлені суперпозицією електронних переходів між заповненими поверхневими та об'ємними станами, розташованими нижче рівня Фермі, у пусті поверхневі стани у забороненій зоні та об'ємні електронні стани у зоні провідності. Такими є, наприклад, особливості з енергією  $\sim 0.26$ ,  $\sim 1.88$ ,  $\sim 1.31$  еВ [9,10].

## Висновки

У роботі детально вивчено особливості пружного та непружного зворотного розсіювання повільних електронів по-різному обробленими поверхнями Ge(111). Встановлено, що тонка структура у спектрах ЗРЕНЕ обумовлена збудженням поверхневих та об'ємних електронних станів. Енергетичне положення більшості особливостей у спектрах ЗРЕНЕ в межах похибки експерименту співпадає для досліджуваних поверхонь, однак, мають місце відмінності прояву деяких особливостей у спектрах. Це може свідчити про те, що набір поверхневих та об'ємних електронних станів є однаковим для всіх досліджуваних поверхонь, але густина цих станів різна.

### Література

1. Х.Ибах, Применение электронной спектроскопии для анализа поверхности (Зинатне, Рига, 1980).
2. С.А.Комолов, Интегральная вторично-электронная спектроскопия поверхности (Изд. Ленинградского университета, Ленинград, 1986).
3. Д.Вудраф, Т.Делчар, Современные методы исследования поверхности (Мир, Москва, 1989).
4. Б.А.Нестеренко, О.В.Снитко, Физические свойства атомарно-чистой поверхности полупроводников (Наукова думка, К., 1983).
5. Т.Ю.Попик, О.Б.Шпенник, Ю.В.Попик, ФТТ 43, 391(2001).
6. Т.Ю.Попик, В.М.Фейер, М.М.Ердевді, Ю.В.Попик, О.Б.Шпенник, УФЖ 46, 456 (2001).
7. Т.Yu. Popik, O.B.Shpenik, P.P.Puga, Yu.V.Popik, J. Optoelectron. Adv. Mater. 2,171(2000).
8. O.B.Shpenik, T.Yu.Popik, V.M.Feyer, Yu.V.Popik, Physica B 315, 133 (2002).
9. T.Yu.Popik, V.M.Feyer, O.B.Shpenik, Yu.V.Popik, Surf. Sci. 491,175 (2001).
10. T.Yu.Popik, V.M.Feyer, O.B.Shpenik, Yu.V.Popik, Surf. Sci. 499, LI 13 (2002).
11. V.M.Feyer, T.Yu.Popik, O.B.Shpenik, Yu.V.Popik, M.M.Erdevdy, J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena 122,251 (2002).
12. О.Б. Шпенник, Н.М. Эрдевди, Н.И. Романюк, Т.Ю. Попик, А.Н. Завилопуло, ПТЭ 41,66(1998).
13. К. Сангвал, Травление кристаллов. Теория, эксперимент, применение (Мир, Москва, 1990).
14. A.Goldoni, A.Santoni, M.Sancrotti, V.R.Dhanak, S.Modesti, Surf. Sci. 382, 336(1997).
15. R.D.Bringans, H.Höchst, Phys. Rev. B. 25,1081 (1982).
16. A.L.Wachs, T.Miller, T.C.Hsieh, A.P.Shapiro, T.-C.Chiang, Phys. Rev. B 32, 2326 (1985).
17. R.D. Bringans, R.LG. Uhrberg, R.Z. Vachrach, Phys. Rev. B 34, 2373 (1986).
18. И.М. Цидильковский, Зонная структура полупроводников (Наука, Физмат-издат, Москва, 1978).

## **SLOW-ELECTRON PROBING OF Ge(111) SURFACES OF VARIOUS MODIFICATION**

**T.Yu. Popik, V.M. Feyer**

Institute of Electron Physics, Ukr. Nat. Acad. Sci.,  
Universytetska St. 21, Uzhhorod, 88000  
e-mail: vfeyer@yahoo.com

Processes of electron excitation of surface and bulk electron states for Ge(111) surfaces of various modification (ground, polished, etched) are studied by low-energy (0-6 eV) electron backscattering technique using a high-resolution (~70 meV) hypocycloidal electron spectrometer. Energy dependences of elastic backscattering intensity and energy loss spectra are studied. The backscattering spectra are shown to be sensitive to the surface state, their fine structure resulting from the excitation of surface and bulk electron states.