

# ОСОБЛИВОСТІ ЗВОРОТНОГО РОЗСІЮВАННЯ ПОВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНІВ ПОВЕРХНЕЮ *n*-GaAs(111)

Л.А.Кірман, В.М.Фейер, Т.Ю.Попик

Інститут електронної фізики НАН України,  
вул. Університетська 21, Ужгород, 88017  
e-mail: leokizman@ukrpost.net

Представлено результати дослідження пружного та непружного зворотного розсіювання повільних (0–3 еВ) моноенергетичних (FWHM  $\sim$  50–70 меВ) електронів поверхнею (111) арсеніду галію, легованого Sn. Тонку структуру в спектрах пов'язано зі збудженням поверхневих та об'ємних електронних станів. Показано, що енергетичні положення виявлених особливостей добре корелюють з енергетичними відстанями між максимумами густини електронних станів, розрахованими теоретично і визначеними іншими експериментальними методами, та суттєво доповнюють їх.

## Вступ

Інтерпретація фізичних процесів, що відбуваються у твердому тілі неможлива без відомостей про його зонну структуру, яка обумовлює властивості об'єкта. Електронна енергетична структура арсеніду галію, який широко використовується у мікро- та наноелектроніці, досліджувалася переважно методами ультрафіолетової та рентгенівської фотоелектронної спектроскопії [1–8]. При цьому одержано досить багату інформацію про структуру валентної зони, а структура зони провідності залишається до кінця не визначеною. Крім того, досить обмеженими є дані і про поверхневі електронні стани.

Виходячи з цього, метою даної роботи було вивчення особливостей будови валентної зони і зони провідності, а також енергетичної структури поверхні GaAs(111) в області 0–3 еВ.

## Методика експерименту і зразки

Дослідження виконано методом зворотного розсіювання електронів низьких

енергій (ЗРЕНЕ), який добре зарекомендував себе для металів [9–11] та елементарних напівпровідників Si та Ge [12–16].

Експерименти проведено на високовакуумній установці ( $P \sim 10^{-8}$  Па) з безмасляною відкачкою. Для одержання моноенергетичного електронного пучка та аналізу пружно і непружно розсіяних електронів використано гіпоциклоїдальний електронний спектрометр. Принцип роботи спектрометра і методику досліджень детально описано в [17, 18].

В умовах даного експерименту характеристики спектрометра були такі: енергія електронів 0–3 еВ, струм первинного пучка  $\sim 10^{-8}$  А, струм відбитого пучка  $\sim 10^{-9} - 10^{-11}$  А, діаметр пучка  $\sim 0,3$  мм, повна ширина енергетичного розподілу електронів у первинному пучку на напіввисоті максимуму (FWHM)  $\sim 40-50$  меВ, енергетичне розділення аналізатора (FWHM)  $\sim 70$  меВ. Процес вимірювань автоматизовано. Сигнал у кожній точці нагромаджується протягом 5–10 секунд, усереднюється і записується у базу даних комп'ютера.

Експерименти проведено на дзеркальних, зорієнтованих до  $1^\circ$  поверхнях (111) паспортизованого монокристаліч-

ного арсеніду галію, легованого Sn, *n*-типу провідності ( $n \sim 1.5 \times 10^{18}$ ,  $\mu \sim 2700$  см<sup>2</sup>/В·с,  $N_d \sim 5 \times 10^4$  см<sup>-2</sup>). Очистка поверхонь здійснювалась прогріванням до 1000–1100 К у вакуумі  $\sim 10^{-7}$  Па протягом 5 годин, бомбардуванням зразка з зворотного боку високоенергетичними електронами ( $U \sim 500$  В,  $I \sim 35$  мА). Контроль чистоти поверхні здійснювався за наявністю чіткої та незмінної тонкої структури у спектрах ЗРЕНЕ, характерної для даної поверхні.

### Експериментальні результати та їх обговорення

У даній роботі досліджено енергетичні залежності інтенсивності пружного розсіювання та спектри енергетичних втрат при різній енергії падаючих електронів (0,5 – 3 еВ) *n*-GaAs(111).

Калібрування енергетичної шкали при дослідженнях пружного зворотного розсіювання здійснювалося за зсувом вольт-амперної характеристики струму на зразок. При цьому за нуль шкали брався максимум функції розподілу падаючого електронного пучка за енергією. При дослідженнях спектрів втрат за нуль шкали бралось енергетичне положення піку пружно розсіяних електронів. Точність калібрування енергетичної шкали становить  $\pm 40$ –50 меВ.

На рис.1 наведено енергетичну залежність інтенсивності (ЕЗІ) пружного розсіювання електронів поверхнею *n*-GaAs(111). Для цієї залежності характерний різкий спад інтенсивності електронного пучка з ростом енергії, на який накладається тонка структура. Як показано нами раніше для Si та Ge [13–16], мінімуми на ЕЗІ пружного розсіювання обумовлені тим, що при деякій чітко визначеній енергії відбувається різке збільшення ймовірності збудження електронних енергетичних станів твердого тіла. Це призводить до того, що частина електронів втрачає енергію і вибуває з потоку

пружно відбитих. Відповідно, у спектрах втрат при цій енергії спостерігаються максимуми. Це підтверджують і одержані нами спектри втрат GaAs(111).

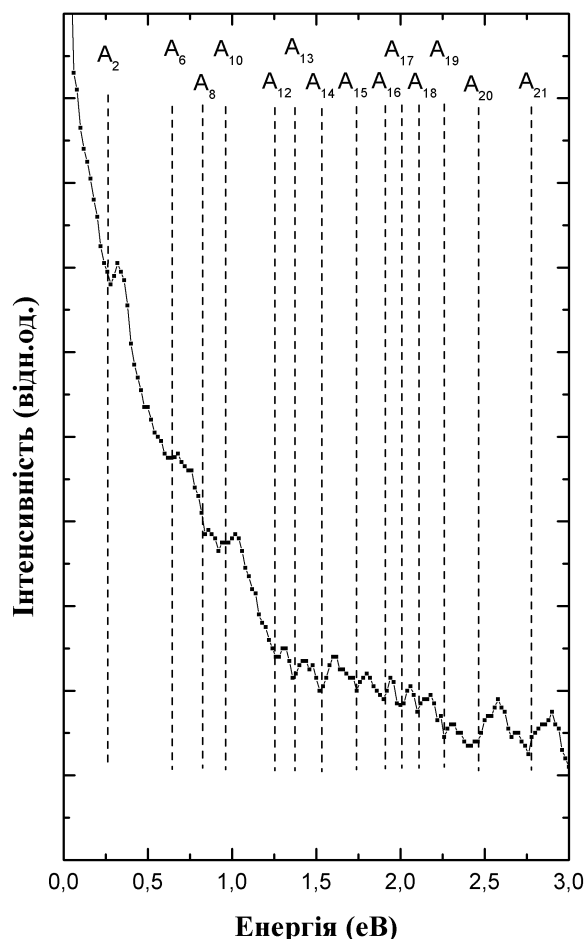


Рис. 1. Енергетична залежність інтенсивності пружного зворотного розсіювання електронів *n*-GaAs(111).

Аналіз одержаних результатів дає можливість стверджувати, що енергетичне положення мінімумів на ЕЗІ пружного розсіювання електронів і максимумів у спектрах втрат у межах похибки експерименту корелюють між собою.

Дослідження спектрів втрат проводилося при різних енергіях падаючих електронів (від 0,5 до 3 еВ з кроком 0,5 еВ), оскільки, як показано нами раніше [13–16], форма спектрів втрат у цій області залежить від енергії збудження. На рис.2 представлено одержані нами спектри енергетичних втрат *n*-GaAs(111).

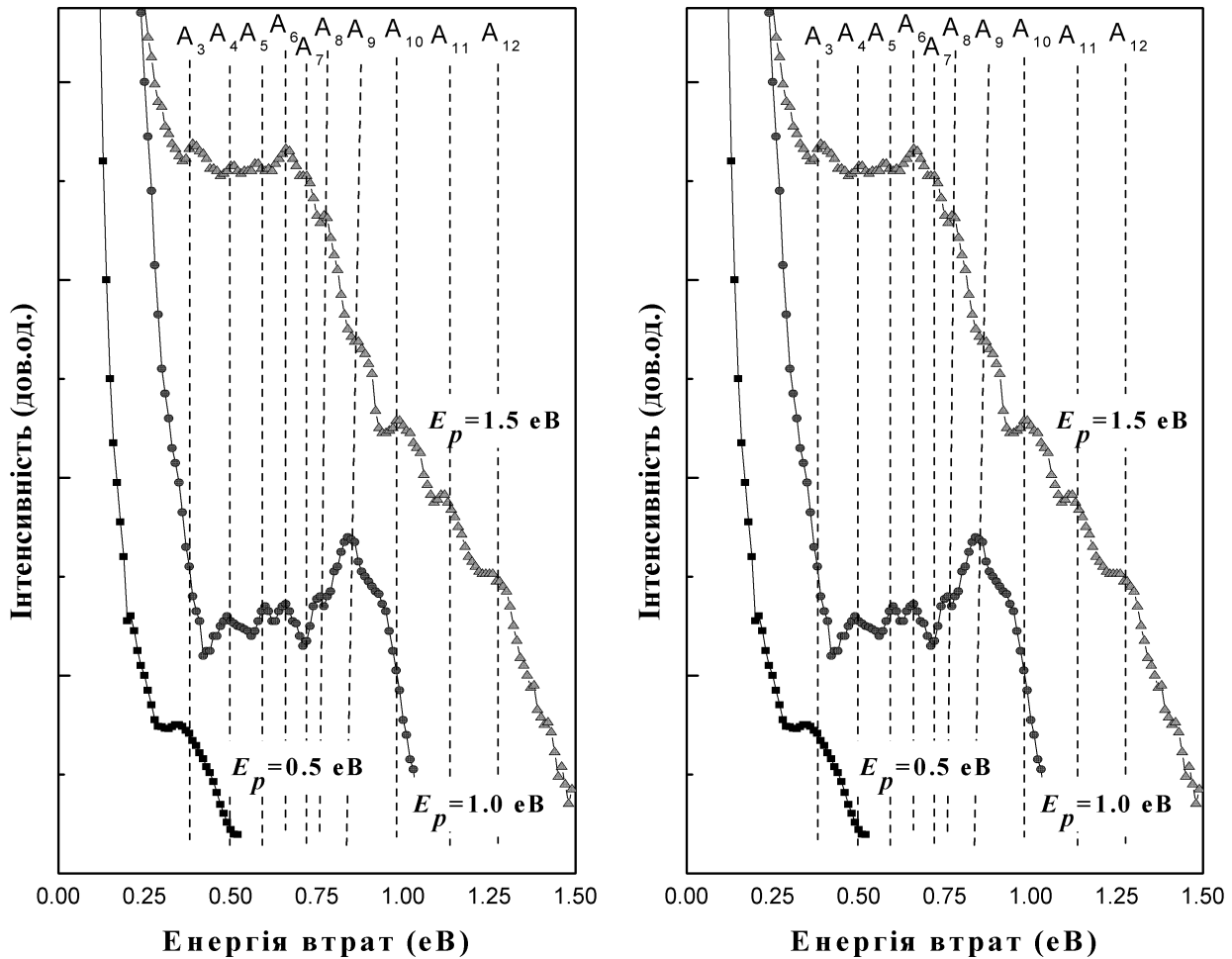


Рис. 2. Спектри енергетичних втрат *n*-GaAs (111) при різних енергіях збуджуючих електронів ( $E_p$ ).

При інтерпретації експериментальних даних ми виходили з того, що ймовірність втрати енергії первинними електронами буде найбільшою при збудженні електронних переходів між максимумами густини заповнених і пустих електронних станів.

Для ототожнення особливостей у спектрах ЗРЕНЕ проаналізовано теоретичні розрахунки зонної структури арсеніду галію, проведені різними методами [19, 20]. Аналіз літературних даних показав, що представлені параметри зонної енергетичної структури суттєво залежать від методу розрахунку і використаних у ньому наближень. Найбільш точно одержані нами експериментальні дані узгоджуються з теоретичними результатами, отриманими емпіричним методом псевдопотенціалу та **kp**-методом (рис.3), за

умови, що для спектрів ЗРЕНЕ не працюють оптичні правила відбору і майже однаково імовірні як прямі, так і непрямі електронні переходи.

Особливості у спектрах, енергія яких не відповідає електронним переходам в об'ємі, пов'язані з наявністю поверхневих електронних станів (ПЕС). Вивченню ПЕС в арсеніді галію присвячено роботи [1–8, 21–26]. Загальний висновок з цих робіт: для ідеальних поверхонь GaAs в області забороненої зони об'єму не повинні існувати поверхневі стани. Однак, наявність сходинок, порушення стехіометрії, хемосорбовані молекули призводять до заморожування рівня Фермі, що свідчить про наявність великої концентрації ПЕС у забороненій зоні. На жаль, їх точне енергетичне положення досі не визначено.

Таблиця 1.  
Енергетичні положення особливостей у спектрах ЗРЕНЕ  
та можливі електронні переходи для *n*-GaAs

№	Пружне розсіювання, $E$ , eВ	Спектри енергетичних втрат, $E$ , eВ	Електронні переходи		Можливі електронні переходи
			Експеримент, $E$ , eВ [21–26]	Теоретичні розрахунки, $E$ , eВ [19, 20]	
A <sub>1</sub>		0.22	0.25	0.25	$\Delta L_{3c}$
A <sub>2</sub>	0.25		0.31	0.30	$\Delta \Gamma_{15c}$
A <sub>3</sub>		0.38	0.40	0.40	$X_{3c} - X_{1c}$
A <sub>4</sub>		0.50	0.46	0.48	$X_{5v} - X_{1c}$
A <sub>5</sub>		0.59	0.60		$\Gamma_1 - S'_1$
A <sub>6</sub>	0.64	0.66	0.65		
A <sub>7</sub>		0.73			
A <sub>8</sub>	0.82	0.79	0.80		
A <sub>9</sub>		0.87			
A <sub>10</sub>	0.96	0.98	0.95		
A <sub>11</sub>		1.13	1.10		
A <sub>12</sub>	1.24	1.26			
A <sub>13</sub>	1.38	1.43	1.50	1.40	$\Gamma_{15v} - \Gamma_{1c}$
A <sub>14</sub>	1.54				
A <sub>15</sub>	1.70	1.65		1.65	$\Gamma_{15v} - L_{1c}$
A <sub>16</sub>	1.88	1.88	1.90		$\Gamma_{15v} - X_{1c}$
A <sub>17</sub>	2.00				
A <sub>18</sub>	2.10	2.18			
A <sub>19</sub>	2.26				
A <sub>20</sub>	2.46	2.49	2.50	2.50	$L_{3v} - L_{1c}$
A <sub>21</sub>	2.76	2.85	2.90	2.80	$\Gamma_{3v} - L_{1c}$

Примітка:  $\Gamma$ ,  $X$ ,  $L$  – високосиметричні точки зведеної зони Бріллюена з максимумами густини електронних станів,  $S$  – ПЕС.

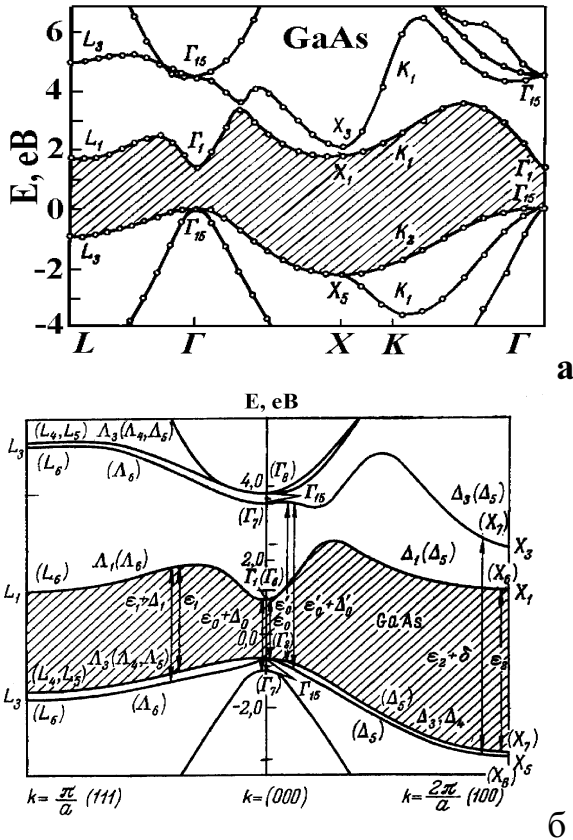


Рис. 3. Зонна структура арсеніду галію, розрахована емпіричним методом псевдопотенціалу (а) та  $kP$ -методом (б).

Енергетичне положення особливостей у спектрах ЗРЕНЕ, усереднене за декількома серіями вимірювань, і дані про можливі електронні переходи для  $n$ -GaAs(111) представлено в Таблиці 1. Видно, що одержані нами результати добре узгоджуються як з теоретичними роз-

рахунками об'ємної зонної структури [19, 20], так і з експериментальними даними інших авторів [21–26]. Неототожені особливості в спектрах ЗРЕНЕ можуть бути обумовлені як поверхневими електронними станами, так і домішковими рівнями. Природу цих станів буде встановлено подальшими дослідженнями.

### Висновки

Виявлено, що особливості на ЕЗІ пружного ЗРЕНЕ і у спектрах втрат  $n$ -GaAs(111) обумовлені збудженням електронних станів.

Встановлено взаємозв'язок особливостей на ЕЗІ пружного ЗРЕНЕ і в спектрах втрат з енергетичними відстанями між точками з максимумами густини об'ємних і поверхневих електронних станів у зведеній зоні Бріллюена арсеніду галію.

Показано, що отримані результати добре узгоджуються як з теоретичними розрахунками зонної структури арсеніду галію, так і з експериментальними даними, одержаними методами УФЕС, РФЕС, фотопоглинання, спектроскопії характеристичних втрат та суттєво доповнюють їх.

Роботу виконано за грантом Президента України для підтримки наукових досліджень молодих вчених GP/F8/0053.

### Література

1. В.В.Немошкаленко, В.Г.Алешин, Электронная спектроскопия кристаллов (Наукова думка, Киев, 1983).
2. Электронная и ионная спектроскопия твердых тел. Под ред. Л.Фирменса, Дж.Вэнника и В.Декейсера (Мир, Москва, 1981).
3. Э. Зенгуил, Физика поверхности (Мир, Москва, 1990).
4. J.Olde, G.Mante, H.P.Barnscheidt, L.Kipp, J-C.Kuhr, R.Manzke, M.Skibowski, J.Henk, W.Schatke, Phys.Rev.B 4, 9958 (1990).
5. J.Henk, W.Schatke, H.P.Barnscheidt, S.Janowitz, R.Manzke, M.Skibowski, Phys. Rev.B 39, 13286 (1989).
6. Б.А.Нестеренко, О.В.Снитко, Физические свойства атомарно-чистой поверхности полупроводников (Наукова думка, Киев, 1983).
7. J.E.Ortega, F.J.Hemsel, Phys.Rev.B 47, 2130 (1993).
8. С.А.Комолов, Интегральная вторично-электронная спектроскопия (Ленинград, 1986).

9. Т.Ю.Попик, О.Б.Шпенник, Ю.В.Попик, ФТТ 43, 391 (2001).
10. Т.Ю.Попик, В.М.Фейер, М.М.Ердевді, Ю.В.Попик, О.Б.Шпенник, УФЖ 46, 456 (2001).
11. V.M.Feyer, T.Yu.Popik, O.B.Shpenik, Yu.V.Popik, M.M.Erdevdy, J. Electron Spectrosc. and Related Phenomena 122, 251 (2002).
12. О.Б.Шпенник, Н.М.Эрдевди, Т.Ю.Попик, ЖТФ 67, 103 (1997).
13. О.Б.Шпенник, Т.Ю.Попик, V.M.Feyer, Yu.V.Popik, Physica B 315, 133 (2002).
14. Т.Ю.Попик, V.M.Feyer, О.Б.Шпенник, Yu.V.Popik, Rad. Phys. Chem. 68, 251 (2003).
15. Т.Ю.Попик, V.M.Feyer, О.Б.Шпенник, Yu.V.Popik, Surface Science 491, 175 (2001).
16. Т.Ю.Попик, V.M.Feyer, О.Б.Шпенник, Yu.V.Popik, Surface Science 499, L113 (2002).
17. Н.И.Романюк, О.Б.Шпенник, Й.А.Манди, Ф.Ф.Папп, И.В.Чернышова, ЖТФ 63, 138 (1993).
18. О.Б.Шпенник, Н.М.Эрдевди, Н.И.Романюк, Т.Ю.Попик, А.Н. Завилопуло, ПТЭ 41, 66 (1998).
19. И.М.Цидильковский, Зонная структура полупроводников (Наука, Москва, 1978).
20. M.L.Cohen, J.R.Chelikowsky, in: Electronic Structure and Optical Properties of Semiconductors, Ed. by M.Cardona (Springer, Berlin, 1989).
21. J.L.A.Alves, J.Hebenstreit, M.Scheffler, Phys. Rev. B 44, 6188 (1991).
22. С.А.Комолов, Я.Галат, Вестник Ленинградского Гос. Ун-та 4, 24 (1982).
23. В.М. Белый, Электронные состояния на GaAs, Препринт № 89-22 (СО АН СССР, Ин-тут неорган. химии, Новосибирск, 1989).
24. R.Ludeke, L.Ley, J. Vac. Sci. Technol. 16, 1300 (1979).
25. D.Haneman, Adv. Phys. 31, 165 (1982).
26. Electron Spectroscopy for Surface Analysis, Ed. by H.Ibach (Springer, Berlin, 1977).

## **SPECIFIC FEATURES OF SLOW ELECTRON BACKSCATTERING BY *n*-GaAs(111) SURFACE**

**L.A.Kizman, V.M.Feyer, T.Yu.Popik**

Institute of Electron Physics, Ukrainian National Academy of Sciences,  
Universytetska St. 21, Uzhhorod, 88017  
e-mail: leokizman@ukrpost.net

Elastic and inelastic backscattering of slow (0–3 eV) monoenergetic (FWHM ~ 50–70 meV) electrons by the (111) surface of Sn-doped GaAs is studied. The fine structure in the spectra is related to the excitation of bulk and surface electron states. The energy positions of the observed features are shown to correlate well with the energy distances between the maxima of the electron density of states calculated theoretically and determined by other experimental techniques as well as essentially complement them.