# РОЗСІЮВАННЯ ПОВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНІВ НА ПЛІВКАХ ВІСМУТУ

**Р. О. Ортіков, Т.Ю. Попик**

Інститут електронної фізики НАН України,
вул. Університетська, 21, Ужгород, 88017
e-mail: iep@iep.uzhgorod.ua

Проведено дослідження процесів розсіювання низькоенергетичних електронів плівками вісмуту, конденсованими на підкладках кремнію та сапфіру. Отримано енергетичні залежності інтенсивності пружно розсіяних назад (на 180°) електронів та спектри втрат при різних енергіях падаючих електронів.

## Вступ

Завдяки своїм унікальним властивостям вісмут, як об'єкт дослідження, відіграв важливу роль у фізиці твердого тіла: на ньому вперше спостерігався сильний магнітоопір, осциляції фізичних параметрів, обумовлені квантуванням густини електронних станів у магнітному полі, незатухаючі НВЧ-хвилі, циклотронний резонанс і генерація акустичного шуму в металах, квантовий розмірний ефект, електронне поперечне фокусування у магнітному полі. На вісмуті проведені перші детальні дослідження магнітних поверхневих рівнів і геометричних осциляцій ультразвуку [1-3]. Вісмут добре відомий як елемент, що за своїми електронними властивостями займає проміжне місце між металами і напівпровідниками і є характерним представником напівметалів. Такі електронні властивості вісмуту тісно пов'язані з невеликою відмінністю його кристалічної гратки від простої кубічної. У вісмуту кристалічна гратка ромбоедрична з двома атомами в елементарній комірці і її можна утворити з простої кубічної шляхом двох незалежних деформацій [4, 5]. Число електронів провідності у вісмуту складає $10^{-5}$ на атом, що є наслідком малого перекриття зон. Ефективна маса електрона вісмуту є сильно анізотропною і може в деяких напрямках складати до 0,001 від маси електрона. Енергія Фермі (як і заборонена зона) складає декілька сотих еВ. Довжина вільного пробігу електронів досягає 1 мм [6, 7]. Електронна енергетична структура вісмуту, яка і обумовлює його властивості, досліджувалася як для монокристалів [8, 9], так і для плівок, напилених на різні підкладки [10-12]. Дослідження плівок стимулюють квантово-розмірні ефекти, що проявляються для вісмуту, бо через малу густину електронів у зоні провідності та велику довжину вільного пробігу електрона вісмут є ідеальним матеріалом для їх дослідження. Зменшення товщини плівки веде до зменшення перекриття зон і наближення електронних властивостей вісмуту до напівпровідникових. А при деякій критичній товщині плівки $d \approx 23$-32 нм перекриття валентної зони та зони провідності має повністю зникнути [13]. Однак, енергетичний розподіл густини поверхневих і об'ємних електронних станів вісмуту ще однозначно не визначений. Крім того, практично недослідженими є процеси збудження цих станів повільними (0-5 еВ) електронами.

Всі ці факти зумовлюють інтерес до дослідження властивостей вісмуту і, в першу чергу, його електронних станів.

## Експеримент

Основними методами дослідження енергетичної електронної структури вісмуту, представленими в літературі, є РФЕС та УФЕС [8-16]. У відділі іонних процесів розроблено метод зворотного

розсіювання електронів низьких енергій, який дозволяє аналізувати як пружно, так і непружно розсіяні назад (на кут 180°) електрони з енергією до 10 еВ і вивчати процеси збудження поверхневих і об'ємних електронних станів [17]. Даний метод добре зарекомендував себе при вивченні взаємодії повільних електронів з різномодифікованими поверхнями металів [18-20], простих та складних напівпровідників [21-27]. Цей метод і був використаний для проведення досліджень.

Метою даної роботи було вивчення характеру зворотного розсіювання електронів низьких енергій плівками вісмуту та виявлення основних тенденцій в енергетичних залежностях інтенсивності пружного розсіювання і у спектрах енергетичних втрат.

Експерименти виконано на високовакуумній (P~$10^{-7}$Па) автоматизованій установці, основним вузлом якої є гіпоциклоїдальний електронний спектрометр (ГЕС), який дозволяє формувати і аналізувати електронний пучок у діапазоні енергій 0-10 еВ з повною шириною енергетичного розподілу на напіввисоті максимуму (FWHM) ~20-50 меВ. Характерною особливістю ГЕС є можливість детектування як пружно, так і непружно розсіяних назад електронів у невеликому (1-3°) тілесному куті з центром у точці падіння електронного пучка. Пропускання спектрометра - ~98%, енергетичне розділення ~20-60 меВ [17, 28].

Характеристики спектрометра в даному експерименті були такими: струм первинного пучка - ≤$10^{-8}$ А, струм відбитого пучка - ~$10^{-9}$ – $10^{-11}$ А, діаметр пучка 0,3 мм, FWHM первинного пучка - ~80-100 меВ, енергетичне розділення аналізатора - ~100-120 меВ. Час нагромадження сигналу у кожній точці - 2-3 с.

## Об'єкти дослідження

Дослідження процесів пружного і непружного розсіювання повільних моноенергетичних електронів проведено для плівок Bi, напилених на полірову поверхню Si (100) та шліфовану поверхню полікристалічного лейкосапфіру α-$Al_2O_3$. Плівки вісмуту для досліджень одержували методом термічного розпилення на установці ВУП-4. Під час напилення температура підкладки була 323 К. Вісмут випаровувався при температурі кипіння (1564 °С). Процес розпилення тривав 10 хв. при тиску залишкових газів не більше 5,3 мПа. Товщина напилених плівок – 3-5 мкм. По закінченні напилення зразки витримувались в насиченій вісмутом атмосфері 24 год., після чого їх переміщували в робочу камеру установки для дослідження процесів розсіювання повільних електронів, в якій створювався вакуум ~$10^{-7}$–$10^{-8}$ Па, який підтримувався протягом всього часу проведення експериментів.

## Результати та їх обговорення

Виконано два типи експериментів з вивчення процесів зворотного розсіювання повільних електронів плівками вісмуту. Досліджено енергетичну залежність інтенсивності пружно розсіяних назад електронів та спектри втрат при різних значеннях енергії падаючих електронів.

Енергетичні залежності інтенсивності пружно розсіяних назад електронів вимірюні при двох різних значеннях потенціалів на відхиляючих циліндричних електродах аналізатора і незмінних значеннях потенціалів на електродах монохроматора (Рис. 1). Калібрування енергетичної шкали при дослідженні енергетичної залежності інтенсивності здійснювалась за зсувом вольт-амперної характеристики струму електронів на зразок. За нуль приймався максимум функції розподілу падаючого електронного пучка за енергією. Виявлено, що зміна потенціалів на відхиляючих електродах аналізатора в межах 0,2 В, не має сильного впливу на загальний хід кривої. Існує загальна тенденція до зменшення інтенсивності відбивання зі збільшенням енергії падаючих електронів. Спектри не виявляють тонкої структури, можливо, через те, що роздільна здатність спектрометра в даному експерименті складала близько 120 меВ.

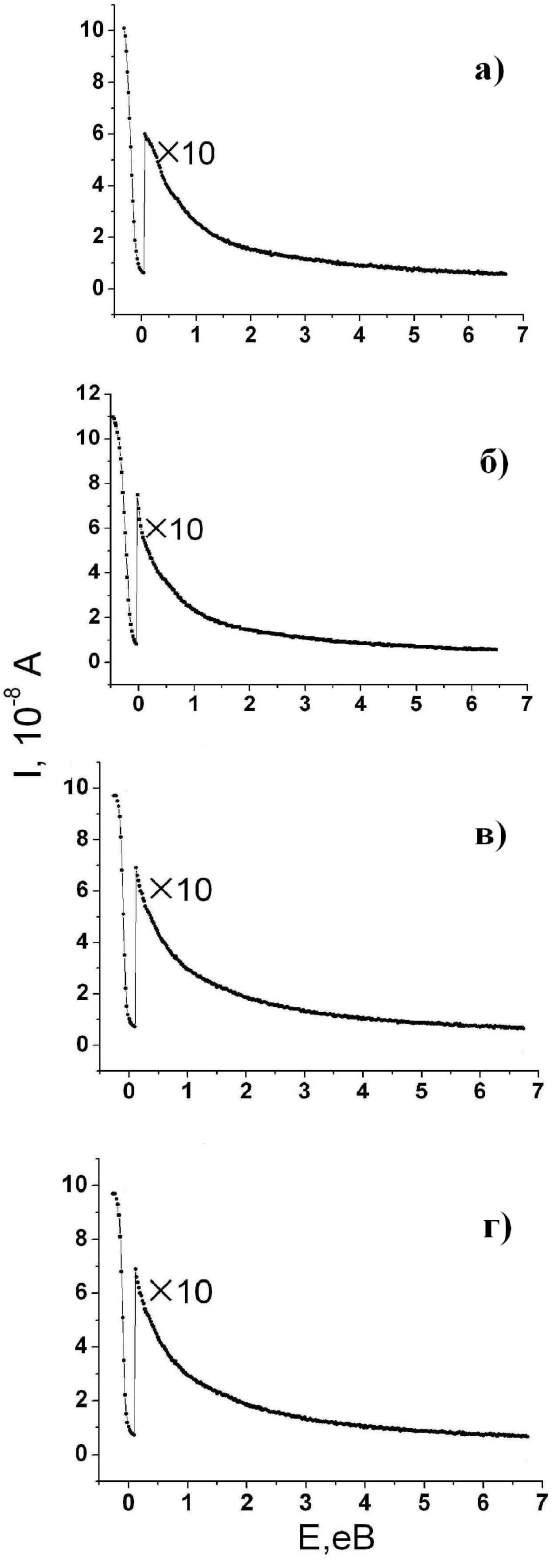


Рис. 1. Енергетичні залежності інтенсивності пружно розсіяних назад (на 180°) електронів плівками вісмуту при різних значеннях потенціалів на відхиляючих електродах аналізатора: а) $Bi/Al_2O_3$ (0,6 еВ); б) $Bi/Al_2O_3$ (0,8 еВ); в) Bi/Si (0,6 еВ); г) Bi/Si (0,8 еВ)

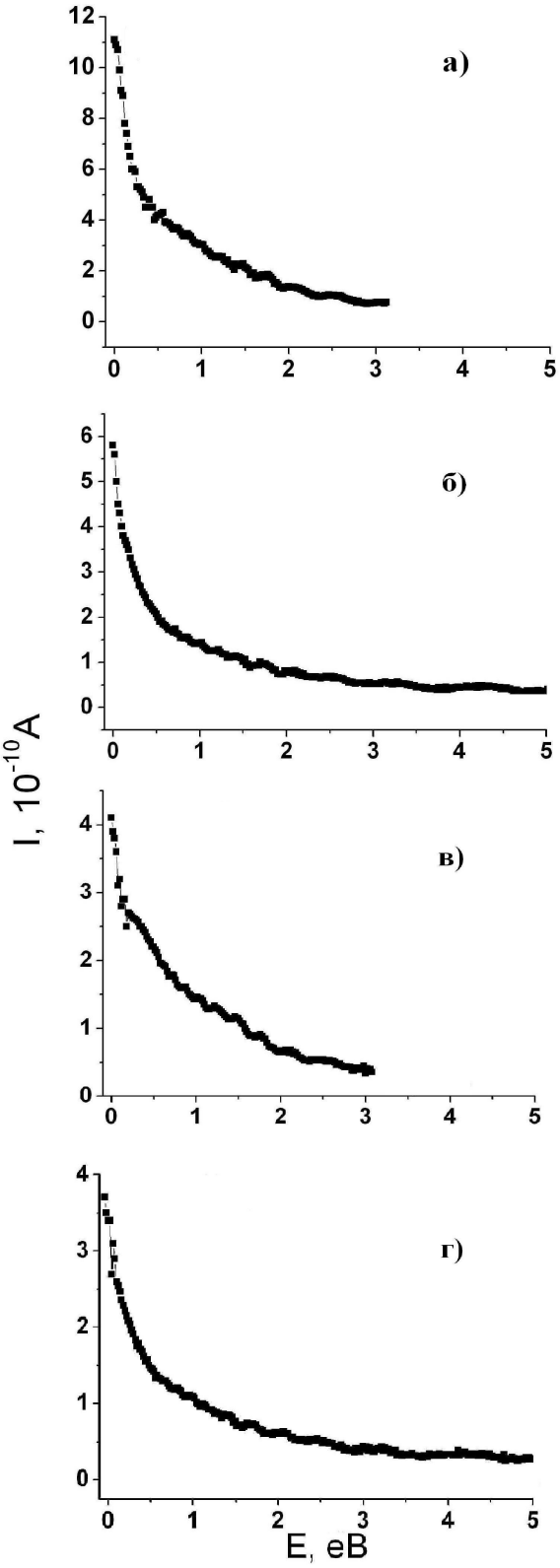


Рис. 2. Спектри енергетичних втрат електронів плівками вісмуту при різних значеннях енергії падаючих електронів: а) $Bi/Al_2O_3$ (5 еВ); б) $Bi/Al_2O_3$ (7 еВ); в) Bi/Si (5 еВ); г) Bi/Si (7 еВ).

Результатами проведення другого типу експериментів є спектри втрат, які представлені для енергій збудження 5 та 7 еВ (Рис. 2). При дослідженні спектрів втрат калібрування енергетичної шкали здійснювалось за енергетичним положенням піку пружно розсіяних назад електронів ($E_l$=0). У цих спектрах для обох зразків при вказаних енергіях первинних електронів характерне зменшення інтенсивності пучка зі зростанням енергії електронів і різкий спад інтенсивності зі збільшенням енергії втрат. На всіх кривих виявлено чіткі особливості. Структура, яка проявляється у спектрах, скоріш за все обумовлена збудженням об'ємних, поверхневих та/або резонансних станів, оскільки існування цих станів в даній області енергій для Bi було виявлено методами УФЕС та РФЕС [8, 10]. Подальші дослідження з покращеним енергетичним розділенням електронного спектрометра та різною модифікацією досліджуваної плівки Bi дозволять більш чітко встановити енергетичні положення виявлених особливостей і ототожнити їх зі збудженням конкретних електронних станів.

Автори висловлюють щиру вдячність старшому науковому співробітнику кандидату технічних наук Лої Василю Юрійовичу за надані для дослідження зразки.

**Література**

1. А.Крэкнел, К.Цонг, Поверхность Ферми (Мир, Москва, 1978).
2. Электроны проводимости, Под ред. М.И.Каганова и В.С.Эдельмана, (Мир, Москва, 1985).
3. T.Jnoue, S.Mase, J. Phys. Soc. Japan 51, 8 (1982).
4. A.B. Shick, J.B. Ketterson, D.L.Novikov, A. J. Freeman, Phys. Rev. B 60, 15484 (1999).
5. Yi Liu, A.E.Roland, Phys. Rev. B 52, 15166 (1995).
6. Л.А.Фальковский, УФН 94, 1 (1968).
7. В.С.Эдельман, УФН 123, 257 (1977).
8. G.Jezequel, I.Thomas, I.Plolini, Phys. Rev. B 56, 6620 (1997).
9. R.Ast Christian, H.Hochst, Phys. Rev. B 66, 125103 (2002).
10. A.Tanaka, M.Hatana, K.Takahashi, H.Sasaki, S.Suzuki, S.Sato, Phys. Rev. B 59, 1786 (1999).
11. A.S.Anopchenko, V.Yu.Kashirin, Yu.F. Komnik, Low Temperature Physics 21, 353 (1995).
12. V.Yu.Kashirin, Yu.F.Komnik, Phys. Rev. B 50, 16845 (1994).
13. R.Ast Christian, H.Hochst, Phys. Rev. Lett. 87, 177602 (2001).
14. Ph.Hofmann, J.E.Gayone, G.Bihlmayer, Yu.M.Koroteev, E.V.Chulkov, Phys. Rev. B 71, 195413 (2005).
15. L.Ley, R.Pollack, S.P.Kowalczyk, R.McFeely, D.A.Shirely, Phys. Rev. Lett. 41A, 429 (1972).
16. R.Ast Christian, H.Hochst, Phys. Rev. Lett. 90, 016403 (2003).
17. О.Б.Шпеник, Н.М.Эрдевди, Н.И.Романюк, Т.Ю.Попик, А.Н.Завилопуло, ПТЭ. №1, 109 (1998).
18. Т.Ю.Попик, О.Б.Шпеник, Ю.В.Попик, ФТТ 43, 391 (2001).
19. Т.Ю.Попик, В.М.Фейер, М.М.Ердевді, Ю.В.Попик, О.Б.Шпеник, УФЖ 46, 456 (2001).
20. V.M.Feyer , T.Yu.Popik, O.B.Shpenik, Yu.V.Popik, M.M.Erdevdy, J. Electron Spectrosc. and Related Phenomena 122, 251 (2002).
21. T.Yu.Popik, V.M.Feyer, O.B.Shpenik, Yu.V.Popik, Surface Science 491, 175 (2001).
22. T.Yu.Popik, V.M.Feyer, O.B.Shpenik, Yu.V.Popik, Surface Science 499, L113 (2002).
23. O.B.Shpenik, T.Yu.Popik, V.M.Feyer, Yu.V.Popik, Physica B 315, 133 (2002).
24. T.Yu.Popik, V.M.Feyer, O.B.Shpenik, Yu.V.Popik, Rad. Phys. Chem. 68, 251 (2003).

25. T.Yu.Popik, V.M.Feyer, O.B.Shpenik, Yu.V.Popik, J. Optoelectron. Adv. Mater. 7, 1539 (2005).
26. T.Yu.Popik, V.M.Feyer, O.B.Shpenik, Yu.V.Popik, Applied Surface Science 252, 3625 (2006).
27. T.Yu.Popik, O.B.Shpenik, P.P.Puga, Yu.V.Popik, J. Optoelectron. Adv. Mater. 2, 171 (2000).
28. Н.И.Романюк, О.Б.Шпеник, Й.А.Манди, Ф.Ф.Папп, И.В.Чернышова, ЖТФ 63, 138 (1993).

# SLOW ELECTRON SCATTERING BY BISMUTH FILMS

**R. O. Ortikov, T.Yu. Popik**

Institute of Electron Physics, Ukr. Nat. Acad. Sci.,
Universytetska Str. 21, Uzhhorod, 88017
e-mail: iep@iep.uzhgorod.ua

The processes of low-energy electron scattering by bismuth films, condensed on silicon and sapphire substrates, are studied. Energy dependences of intensities of elastically backscattered (180°) electrons and loss spectra are obtained fir different energies of the bombarding electrons.