

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

На правах рукопису

УДК: 637.231

639.533

Стадник Олександр Анатолійович

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ТА СТРУКТУРНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХОНЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ ПРИ АДСОРБЦІЇ  
НА НИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІІІ-V ГРУП ТА ОРГАНІЧНИХ ШАРІВ.

01.04.07 - Фізика твердого тіла

#### А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ-1996

598  
539



00743885 (Z)

Дисертація є рукопис.

Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників НАН України

Науковий керівник:

чл.-кор. НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор  
Нестеренко Б.О.

Офіційні опоненти:

чл.-кор. НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор  
Литовченко В.Г.

кандидат фізико-математичних наук Гояса С.Н.

Провідна організація: Інституті фізики НАН України

Захист відбудеться "20" жовтня 1998 р. о 14<sup>15</sup> год. на  
засіданні Спеціалізованої наукової ради 60.07.02 при Інституті  
фізики напівпровідників НАН України за адресою:

252650, Київ-28, проспект Науки, 45.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці інституту.

Відгуки на автореферат у двох примірниках, засвідчені печат-  
кою, прохання надсилати за вказаною адресою на ім'я вченого  
секретаря спеціалізованої ради.

Автореферат розіслано "14" листопада 1998 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради  
кандидат фізико-математичних наук

Г.Ю.Рудько

ДВ 36 055

АКТУАЛЬНІСТЬ

Основні тенденції розвитку сучасної мікроелектроніки зумовлені значним розвитком фізики поверхні напівпровідників і її успіхи у технології. Остання, використовуючи умови надвисокого вакууму (НВВ), дозволяє отримувати атомарно-чисті поверхні (АЧП) і атомарно-різкі межі розподілу.

Основним матеріалом напівпровідникової мікроелектроніки є кремній, особливо його низькоіндексні грані. Серед них атомарно-чиста поверхня (ПЧ) досліджена найменше. В той же час вивчення цього об'єкта, яке почалось лише у останні 5-10 років, що пов'язано, головним чином, з труднощами отримання власної структури вказаної поверхні і її збереженням, сприяло б розумінню властивостей інших граней та встановленню умов керування ними.

Інформація про АЧП кремнію (ПЧ) у переважній більшості стосується її структури та будови адсорбційних фаз на ній. Але електронні характеристики такі, як розподіл електронних станів (ЕС) цієї поверхні та адсорбованих на ній шарів різних елементів, лишаються до цього часу майже не вивченими. Незважаючи на прогрес у розумінні мікроскопічних особливостей межі метал-напівпровідник, лишається не визначеним питання відносно природи ЕС на ній і керування їх властивостями.

Фізичні та технологічні обмеження розмірів елементів у сучасній напівпровідниковій мікроелектроніці стимулюють активний пошук і розробку нових технологій та напрямків електронного приладобудування надмалих розмірів. Одним з них є молекулярна електроніка. Вона розглядає можливість використання одиначної органічної молекули або групи таких молекул як елемента, що здатний обробляти та зберігати інформацію.

Для утворення пристроїв молекулярної електроніки потрібні методи конструювання молекулярних груп з визначеними властивостями. Найбільш простим та ефективним з них визнано технологію плівки Ленгмюра-Блоджетт (ПЛБ). Пошаровий перенос плівки забезпечує впорядкованість у напрямку нормалі до підкладки, що є фундаментальною фізичною властивістю цих об'єктів. Більш складною і ще не вирішеною проблемою є отримання структур з двовимірним дальнім порядком у ПЛБ на поверхнях напівпровідників.

У зв'язку з висловленим вище МЕТОЮ РОБОТИ було:

1. Розробка надійної технології отримання АЧП кремнію (ПЧ) і ад-

сорбції на неї різних хімічних елементів.

2. Дослідження структури, електронних характеристик та кінетики фотопровідності отриманих об'єктів, впливу на них адсорбції атомів Al, Pb, Sb у максимально визначених умовах (надвисокий вакуум (НВВ), постійний контроль хімічного складу поверхні).

3. Дослідження можливості утворення двовимірно впорядкованих ПЛБ органічних речовин на напівпровідникових підкладках, вивчення ролі фізико-хімічного стану підкладок у формуванні плівок.

Для досягнення поставленої мети потрібно було вирішити такі ОСНОВНІ ЗАДАЧІ:

1. Відпрацювання технології отримання АЧП Si(IIО) з власною суперструктурою "16x2" і адсорбції на неї металів: Pb, Al та Sb.

2. Дослідження структури та електронних характеристик АЧП кремнію (IIО).

3. Визначення впливу адсорбції атомів вказаних елементів на структуру, електронні характеристики та кінетику фотопровідності поверхні.

4. Дослідження двовимірної впорядкованості ПЛБ стеаринової кислоти на різних напівпровідникових підкладках.

Вирішення цих задач вимагало розробки чи освоєння комплексу ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ МЕТОДІВ дослідження, в числі яких:

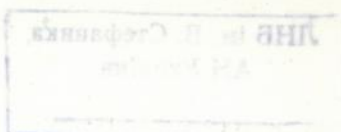
1- створення НВВ установки для комплексного дослідження АЧП, яка б дозволяла контролювати структуру поверхні, її хімічний склад та проводити електрофізичні вимірювання при тиску не вище 2 ІО Па.  
- опанування методами дифракції повільних електронів (ДПЕ), Оже-та рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, кінетики ефекту поля (КЕП), фотоЕРС, кінетики фотопровідності і спектроскопії виходу фотоелектронів.

- розробка методик отримання АЧП Si(IIО)-"16x2", контрольованої адсорбції різних хімічних елементів на неї, а також конструкція електронної та іонної гармат, які використовувались у роботі.

#### НАУКОВА НОВИЗНА:

1. Отримано дані про поверхневий вигин зон та розподіл поверхневих електронних станів у забороненій зоні атомарно-чистої поверхні Si(IIО)-"16x2", що дало змогу вперше побудувати її енергетичну діаграму.

2. Досліджено вплив адсорбції елементів III-V груп (Al, Pb, Sb) пе-



ріодичної системи на розподіл поверхневих електронних станів у забороненій зоні поверхні Si(IIO).

3. Визначено взаємозв'язок структурних і електрофізичних характеристик систем Si(IIO)+адсорбат (Al,Pb,Sb). Запропоновано структурні моделі поверхні, які пояснюють його.

4. Показано відсутність поверхневої рекомбінації при нанесенні не-впорядкованих моношарів Al та Pb на поверхню Si(IIO)-"I6x2".

5. Вперше отримано і зафіксовано двовимірно впорядковану структурну фазу бішару стеаринової кислоти на атомарно-чистій поверхні напівпровідника Cd<sub>0.8</sub>Hg<sub>0.2</sub>Te (III).

#### ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ:

1. Створено надвисоковакуумну установку для комплексного вивчення структурних і електрофізичних характеристик атомарно-чистих поверхонь твердого тіла.

2. Отримано ряд нових експериментальних результатів, які дозволяють поглибити наші уявлення та стимулюють подальші теоретичні розрахунки загальної фізичної моделі поверхні твердого тіла, здатної узгоджено пояснити всю сукупність її структурних, механічних, коливних і електронних властивостей.

3. Інформація про структурні та електрофізичні характеристики поверхні Si(IIO)-"I6x2", вплив на них адсорбції атомів Al,Pb,Sb може бути використана у технологічних рекомендаціях з метою покращення міжфазних границь.

4. Можливість отримувати двовимірно впорядковані органічні шари стимулює розвиток інтегральної оптики, зокрема, світловодів мікронних розмірів з низькими втратами сигналу.

#### ПОЛОЖЕННЯ, ЯКІ ВІНОСЯТЬСЯ НА ЗАХИСТ:

1. Атомарно-чиста поверхня Si(IIO) має власною поверхневою фазою суперструктуру "I6x2". У забороненій зоні поверхні існує дві зони поверхневих електронних станів, які розділені енергетичним проміжком  $E_g = 0,4$  eV. Причиною існування цих зон є перекриття обірваних валентностей атомів кремнію та нееквівалентність їх зв'язків. Характер поверхневого вигину зон при цьому відповідає випадку збіднення поверхні на основні носії як для n-, так для p-типу.

2. Адсорбція алюмінію та свинцю на поверхню Si(IIO)-"I6x2" при кімнатній температурі створює умови для значного перерозподілу поверхневих електронних станів у забороненій зоні напівпровідника.

Утворюються великі енергетичні проміжки між ефективними рівнями поверхневих електронних станів у забороненій зоні (Si-Al) або між ефективними рівнями і границями об'ємних зон (Si-Pb), що сильно послаблює рекомбінацію через поверхню.

3. Серед умов двовимірного впорядкування плівок Ленгмюра-Блоджетт найбільш важливим є фізико-хімічний стан підкладки. Наявність сходинок на чистій хімічно пасивній поверхні  $\text{CdHg-Te}$  (III), орієнтованих по кристалографічному сімейству (II2), сприяла росту органічних плівок стеаринової кислоти з двовимірним дальнім порядком. Присутність аморфних окислів на гранях Si(III), GaAs(II) виключала таку можливість.

#### ОСОБИСТІЙ ВНЕСОК АВТОРА ДИСЕРТАЦІЇ

Автор роботи приймав участь у створенні надвисоковакуумної установки для комплексного дослідження атомарно-чистих поверхонь напівпровідників. Ним опановано та особисто налагоджено у дослідницькій камері всі експериментальні методики, що застосовувалися у дисертаційній роботі. Серед них : дифракція повільних електронів, Оже-електронна спектроскопія, кінетика ефекту поля, кінетика фотопровідності, фотоелектрорушійна сила, термоелектронна робота виходу, джерела іонно-аргонних пучків для очистки поверхонь, засоби контрольованої адсорбції елементів Al, Pb та Sb.

Всі результати викладені у роботі, отримано ним у повному обсязі. Виключення складають дані досліджень спектроскопією виходу фотоелектронів поверхні Si(II0)-"I6x2" та двовимірно впорядкованих шарів стеаринової кислоти, у яких автор приймав участь частково.

Автор приймав участь у обговоренні та науковому узагальненні всіх отриманих результатів. Йому повністю належить підготовка матеріалів для публікація.

#### АПРОБАЦІЯ РОБОТИ:

- Головні результати роботи доповідались і обговорювались на:
- V Міжнародній конференції по плівках Ленгмюра-Блоджетт ("LB-5") ( Париж ( Франція), 1991 ).
  - Всесоюзному симпозиумі "Емісія с поверхности полупроводников, в том числе экзоемиссия" ( Львів, 1989 ).
  - I Міжнародній конференції з фізики низьковимірних структур, ( Чорноголовка ( Росія), 1993 ).

- 14-а Європейська конференція з фізики поверхні ("ECOSS-14"),  
( Лейпціг ( Німеччина ), 1994 ).

#### ПУБЛІКАЦІЇ

Головні результати дисертації надруковано у 3 роботах, 2 тезах і 2 роботах, що незабаром вийдуть друком, перелік яких наведено в кінці автореферату.

#### ОБ'ЄМ І СТРУКТУРА ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертація складається з вступу, чотирьох глав і заключення. Вона містить 182 сторінки тексту, 62 малюнки, 9 таблиць і список літератури з 129 назв.

У першій главі розглянуто сучасні погляди на поняття атомарно-чистої поверхні твердого тіла, основні способи її отримання та методи дослідження, а також на причини, які викликають реконструкцію поверхні. Зроблено детальний огляд робіт, присвячених вивченню атомарно-чистої поверхні Si(110), адсорбції на ній різних хімічних елементів та нанесенню на поверхні твердого тіла двовимірних впорядкованих шарів органічних речовин.

Друга глава знайомить з експериментальними установками, методами та пристроями, що застосовувались у ході досліджень.

Для отримання АЧП кремнію (110) з власною суперструктурою "16x2" і даних про її структуру та електрофізичні параметри було створено НВВ установку комплексного вивчення поверхонь твердих тіл, яка дозволяла використовувати у процесі досліджень широке коло методик, поширених у фізиці поверхні твердого тіла. Зокрема, крім ДПЕ, РФЕС та ЕОС, що давали інформацію про структуру та хімічний склад поверхні відповідно, установку було укомплектовано пристроями для спостереження кінетики ефекту поля та порогової фотоемісії (розподіл електронних станів у забороненій зоні), вікнами для дослідження кінетики фотопровідності, джерелами адсорбатів. Величини адсорбційних покриттів Al, Pb, Sb розраховувалися, виходячи із закону обернених квадратів та геометрії при повному розпиленні відомих наважок (похибка 10-15%). Пошарове нанесення ПЛБ контролювалось еліпсометрією.

Третя глава складається з двох розділів. У першому з них наведено результати досліджень електронних параметрів АЧП Si(110) з власною суперструктурою "16x2" (поверхневий вигин зон, розподіл ПЕС у 33 напівпровідника, час релаксації фотопровідності  $\tau$ ), які отримано методами спектроскопії виходу фотоелектронів (СВФ), фото-

ЕРС, кінетики ефекту поля (КЕП) та при вивченні кінетики фотопровідності вказаної поверхні.

Методом СВФ визначено величини роботи виходу (4,72 еВ) та енергії фотоіонізації (5,32 еВ) поверхні Si(110)-"16x2", що дозволило, знаючи рівень об'ємного легування  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  для n-типу зразка, знайти величину поверхневого вигину зон. Спектр виходу фотоелектронів показав існування широкої ( $\geq 1$  еВ) зони заповнених ПЕС. Максимум щільності станів цієї зони лежить нижче вершини валентної зони, а хвіст розподілу знаходиться у ЗЗ напівпровідника.

Дані СВФ по вигину зон було підтверджено незалежним чином за допомогою методу ФотоЕРС ( $V_{ph}$ ). Він дорівнює 0,12 еВ для n-типу зразків і 0,25 еВ для p-типу. Характер вигину зон для обох типів зразків відповідає випадку виснаження поверхні на основні носії.

Енергетичні положення ефективних рівнів ПЕС у ЗЗ Si(110)-"16x2" визначено методом кінетики ефекту поля, можливість використання якого для вивчення ПЕС на АЧП кремнію показано у [12]. Їх енергії відносно країв ЗЗ дорівнюють  $E_c - E_{t1} = 0,37$  еВ та  $E_{t2} - E_v = 0,33$  еВ. Цілком природньо співставити ефективному рівню  $E_{t1}$  зону заповнених станів, яка спостерігалась у дослідях по СВФ.

Величина часу релаксації фотопровідності, визначена при дослідженні кінетики фотопровідності, дорівнює 37 нсек.

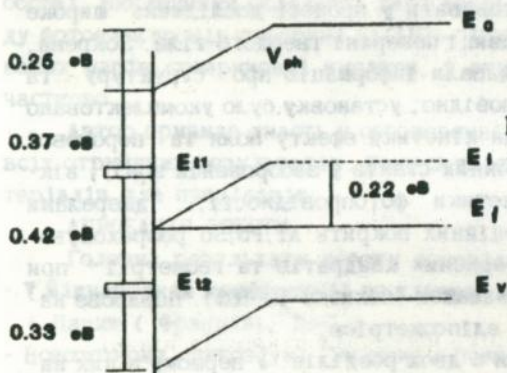


рис.1 Енергетична діаграма поверхні Si(110)-"16x2" (p-тип зразка).

Сукупність отриманих нами електронних характеристик поверхні  $\text{Si}(\text{II})$ - $16 \times 2$  (табл. I), дозволила побудувати її енергетичну діаграму, рис. 1. З неї видно, що ПЕС у ЗЗ поверхні  $\text{Si}(\text{II})$ - $16 \times 2$  характеризуються двома ефективними рівнями  $E_{\pi}$  та  $E_{\sigma}$ . Рівень  $E_{\sigma}$  відповідає верхній межі зони заповнених станів, визначеної у дослідях по СВФ, а рівень  $E_{\pi}$  позначає нижній край зони порожніх. Енергетична щільність  $E_{\sigma}$  між ними дорівнює 0,4 еВ. Ця величина значно перевищує значення  $E_{\sigma}$  для  $\text{Si}(\text{III})$ - $7 \times 7$  (0,2 еВ) і менша ніж для  $\text{Si}(\text{I})$ - $2 \times 1$  (0,49 еВ).

Нами зроблено висновок, що причиною існування двох зон ПЕС (порожньої та заповненої) у ЗЗ  $\text{Si}(\text{II})$ - $16 \times 2$  є перекриття обірваних валентностей (ОВ) адатомів кремнію, які мають нееквівалентні зв'язки з найближчими сусідами (кожен з них має два сильні  $\sigma$ -зв'язки у ланцюгу атомів вздовж азимуту  $[110]$  і один слабкий  $\pi$ -зв'язок вздовж напрямку  $[001]$ ) рис. 2. Це впливає з порівняння моделей поверхонь  $\text{Si}(\text{II})$ - $16 \times 2$  /3/ та  $\text{Si}(\text{III})$ - $7 \times 7$ , які складаються з однакових структурних елементів, з урахуванням співвідношення енергетичних проміжків  $E_{\sigma}$  між зонами ПЕС у ЗЗ кремнію для вказаних поверхонь.

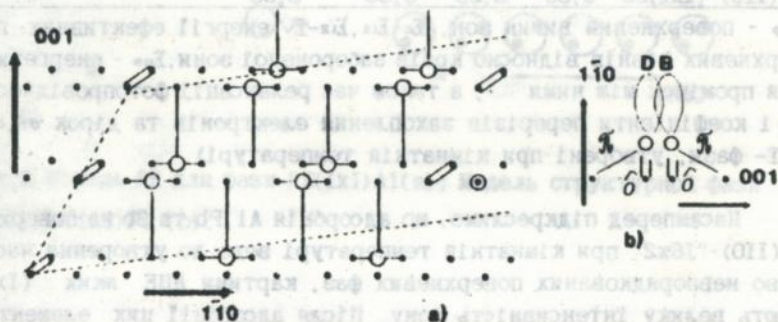


рис. 2 Модель поверхні  $\text{Si}(\text{II})$  з нееквівалентними зв'язками адатомів (фрагмент комірки); а- вид зверху; б- вид збоку.

У другому розділі третьої глави розглянуто вплив адсорбції атомів Al, Pb, Sb на структуру і вказані вище електронні характеристики поверхні Si(IIО)-"I6x2" при кімнатній температурі (КТ) останньої. Визначено подальші зміни, що відбуваються при упорядненні поверхневих адсорбційних фаз під впливом прогріву.

Таблиця I. Величини електронних параметрів поверхні Si(IIО)-"I6x2" і поверхневих структур, утворених при адсорбції на неї атомів Al, Pb, Sb та подальших відпалах.

	$V_{np}$	$E_c - E_{11}$	$E_{12} - E_v$	$E_{00}$	$\tau_f$	$\sigma_n$	$\sigma_p$
	еВ	еВ	еВ	еВ	нксек	см <sup>2</sup>	см <sup>2</sup>
Si(IIО)-"I6x2"	0,25	0,37	0,33	0,42	37	10 <sup>-16</sup>	10 <sup>-15</sup>
RT(IxI)Al	0,63	0,18	0,12	0,82	300	10 <sup>-19</sup>	10 <sup>-18</sup>
Si(IIО)-(Ixθ)Al	0,35	0,35	0,43	0,34	34	10 <sup>-17</sup>	10 <sup>-17</sup>
RT(IxI)Pb	0,10	0,43	0,72	0	250	10 <sup>-17</sup>	10 <sup>-16</sup>
Si(IIО)-(IxI)Pb	0,10	0,27	0,62	0,23	180	10 <sup>-18</sup>	10 <sup>-18</sup>
RT(IxI)Sb	0,05	0,28	0,40	0,44	-	-	-
Si(IIО)-(IxI)Sb	0,06	0,26	0,36	0,50	-	-	-

$V_{np}$  - поверхневий вигин зон,  $E_c - E_{11}, E_{12} - E_v$  енергії ефективних поверхневих рівнів відносно країв забороненої зони,  $E_{00}$  - енергетичний проміжок між ними, а також час релаксації фотопровідності  $\tau_f$  і коефіцієнти перерізів захоплення електронів та дірок  $\sigma_n, \sigma_p$ . (RT- фази, утворені при кімнатній температурі)

Насамперед підкреслимо, що адсорбція Al, Pb та Sb на поверхню Si(IIО)-"I6x2" при кімнатній температурі веде до утворення частково неупорядкованих поверхневих фаз, картини ДПЕ яких (IxI) мають велику інтенсивність фону. Після адсорбції цих елементів зафіксовано помітні зміни електронних характеристик поверхні.

Система Si(IIО)-Al має дві зони поверхневих електронних станів у 33 поблизу її країв, енергетичний проміжок між ними  $E_{00}$  дорівнює 0,8 еВ, що дозволяє формувати поверхневий вигин зон у відповідності з контактною різницею потенціалів пари Al-Si(IIО) (р-тип). Взаємозв'язок зафіксованих структурних та електронних змін при адсорбції Al на Si(IIО)-"I6x2" можна пояснити реконструкцією,

подібною до відомої Rotation Relaxation (рис. 3а), яка має місце на поверхні GaAs (110). Доречно підкреслити, що завдяки такій перебудові 33 цієї поверхні стає вільною від ПЕС /4/.

Система Si(110)-Pb, навпаки, має лише одну частково заповнену зону (дискретний рівень) поверхневих електронних станів у заборонення зоні. Вона знаходиться на 0,7 еВ вище верхньої межі валентної зони.

Адсорбція 1-2 моносарів Al та Pb на Si(110)-"16x2" призводить до різкого (майже на порядок) зростання часу релаксації фотопровідності: з 37 мксек на чистій поверхні Si(110)-"16x2" до 300 мксек та 250 мксек відповідно.

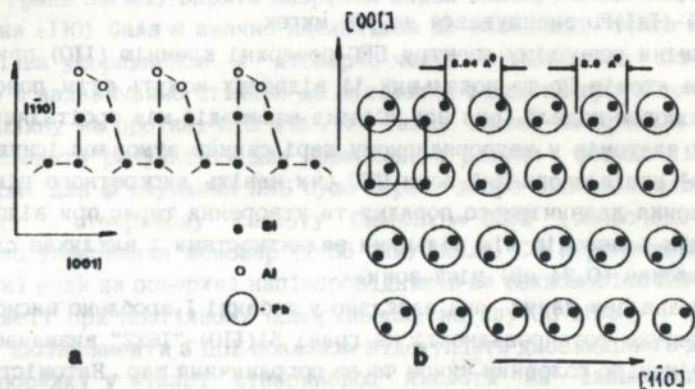


рис.3 Модель RR для фази  $Si(110)-(1 \times 1)Al$  (а); Модель структурної фази  $Si(110)-(1 \times 1)Pb$  (б).

Подальший відпал системи  $Si(110)+Al$  при температурах 800-1000 К приводив до впорядкування поверхні - утворення нової суперструктури  $Si(110)-(1 \times 9)Al$  і зміни електронних параметрів поверхні, які наблизились за своїми величинами до виміряних на АЧП  $Si(110)-"16 \times 2"$  (див. табл. I).

Відпали системи  $Si(110)-Pb$  з температурами 400-500 К впро-

довж 20-40 сек. суттєво поліпшували якість дифракційних картин (IхI), що свідчило про упоряднення адсорбованого шару. Енергетичний аналіз отриманих електронограм, на підставі роботи Хенцлера /6/, дозволив зробити висновок, що в упорядкованій фазі (IхI)Pb покриття свинцем відповідає 0,5 МШ і утворенню простої ґратки (рис.3b). Поряд з однорідним шаром атомів свинцю існує набір терас з шириною до 30 Å, які включають нестехіометричні (надлишкові над 0,5 МШ) атоми свинцю. Впорядкування структури поверхні мало впливало на розподіл ПЕС у 33, викликаючи лише невелике розщеплення напівзаповненого рівня (табл. I), але цей перерозподіл ПЕС впливав на час релаксації фотопровідності  $\tau$ , який для впорядкованої фази Si(IIО)-(IхI)Pb зменшувався до 180 мксек.

Зміни розподілу спектру ПЕС поверхні кремнію (IIО) при адсорбції атомів Pb та подальших її відпалах можуть бути пояснені за допомогою моделі (рис.3b). Слабке взаємодія між орбіталами сусідніх атомів у неупорядненому шарі свинцю зумовлює існування вузької напівзаповненої зони ПЕС (чи навіть дискретного рівня). Поліпшення двовимірного порядку та утворення терас при відпалах підвищує взаємодію між вільними валентностями і викликає слабе розщеплення (0,24 еВ) цієї зони.

З аналізу даних, які наведено у таблиці I, зроблено висновок, що кінетика фотопровідності на грані Si(IIО)-"I6х2" визначається рекомбінацією головним чином через пограничний шар. Натомість адсорбція 1-2 моносарів Al і Pb при кімнатній температурі підкладки приводить до того, що релаксація фотопровідності фактично повністю йде через об'єм. В упорядкованих фазах, що утворюються після відпалів - (Iх9)Al та (IхI)Pb, знову з'являється рекомбінація через поверхню, частка якої залежить від особливостей розподілу електронних станів у згаданих системах.

Підсумовуючи наведені у таблиці наші дані та результати інших дослідників /5/, можна визначити, що адсорбція моносару Sb на АЧП кремнію (IIО) при КТ утворює неупоряднену фазу. Подальші проґриви системи Si(IIО)-Sb при температурі  $\approx 700^\circ\text{C}$ , які супроводжуються десорбцією Sb, упорядковують поверхню. Утворена внаслідок цього суперґруктура Si(IIО)-(2хI)Sb є перехідною між фазами  $\alpha$  та  $\beta$  структури (2х3)Sb /5/ і має деякий ступінь неупорядкованості. При цьому частина ОБ атомів кремнію лишається ненасиченою, а

характер розподілу ПЕС залишається подібним до випадку АЧП (ІІО) кремнію.

Дослідження атомної адсорбції неорганічних елементів на поверхні напівпровідників ми продовжили адсорбцією молекулярних органічних сполук. Четверта глава присвячена вивченню можливості утворення двовимірно упорядкованих шарів органічних сполук на напівпровідникових підкладках. Серед них були травлена (ІІІ) і сколота (ІІО) грані Si та GaAs, відповідно, а також поверхня (ІІІ) CdHg<sub>x</sub>-Te, яка була очищена іонно-аргонним бомбардуванням. Вибираючи ці об'єкти, ми виходили з загальновідомого факту, що травлена грань Si(ІІІ) вкрита аморфним шаром окислу, свіжосколота поверхня (ІІО) GaAs є значно пасивнішою до окисації, тобто має бути більш упорядненою. А атомарно-чиста підкладка CdHg<sub>x</sub>-Te (ІІІ) є надзвичайно стійкою до окислення і здатна протистояти його впливу на протязі 2-3 діб /7/. Таким чином, ми зробили спробу співставити результати для поверхонь з різним фізико-хімічним станом. Для формування ПЛБ було обрано добре вивчений модельний об'єкт - стеаринову кислоту CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>-COOH (скорочено С<sub>n</sub>). Щільно упаковані моношар (2,05 (нм)<sup>2</sup>/мол.) С<sub>n</sub> переносився з поверхні води на поверхні напівпровідників за технологією Ленгмюра-Блоджетт при постійному поверхневому натягу 30 мН/М.

Експерименти з ДПЕ показали відсутність двовимірного дальнього порядку у бішарі стеаринової кислоти на сильноокислених (Si(ІІІ)) та слабоокислених (GaAs(ІІО)) підкладках, а на упорядкованій, хімічно пасивній підкладці CdHg<sub>x</sub>-Te (ІІІ) його наявність в плівці С<sub>n</sub>. При енергіях первинних електронів 10-30 еВ спостерігалась дифракційна картина гексагональної симетрії, період ґратки у площині ПЛБ дорівнював 0,5<sup>±</sup>0,05 нм. Вигляд електронogram свідчив, що бішар С<sub>n</sub> сформовано з доменів, які мають переважну орієнтацію і їх розміри близькі до довжини когерентності ДПЕ (10-30 нм). Така фаза С<sub>n</sub> існувала на всій поверхні CdHg<sub>x</sub>-Te (ІІІ).

Двовимірне впорядкування ПЛБ призводило до поліпшення її діелектричних властивостей, про що свідчать виміри ВАХ (метод Андерсона) термоелектронного струму з бішаром С<sub>n</sub> і без нього. У зразку з бішаром С<sub>n</sub> вольтамперна характеристика зсунута у бік додатних потенціалів на (1,3<sup>±</sup>0,2) В і має менший струм насичення. Причиною зсуву ВАХ є зарядка плівки С<sub>n</sub> потоком електронів. Значна величина електричного поля у ПЛБ (3,2 · 10<sup>6</sup> В/см), що виникає

внаслідок зарядки, свідчить про високу діелектричну міцність дво-  
вимірно упорядкованого бішару  $C_{60}$  на поверхні  $Cd_{1-x}Hg_xTe$  (III)  
та перспективність її використання як діелектричного покриття.

Послаблення інтенсивності спектральних ліній компонент під-  
кладинки в методі РФЕС при пошаровому нанесенні  $C_{60}$ , яке добре  
описується експоненціальним співвідношенням:  $I = I_0 \exp(-L/\lambda)$ , ( $L$  -  
товщина плівки,  $\lambda$  - довжина вільного пробігу фотоелектронів у  
ній), дозволило визначити значення  $\lambda$  фотоелектронів, які збуд-  
жуються з різних основних рівней, тобто мають різні кінетичні  
енергії у плівці  $C_{60}$ . Отримана величина  $\lambda$  лежить у межах від 4,5  
нм (лінія  $Te-3d_{5/2}$ , кінетична енергія фотоелектронів  $E_{кін} = 681$  eВ)  
до 7,5 нм ( $Hg-4f_{7/2}$ ,  $E_{кін} = 1154$  eВ). Орієнтуюча дія підкладинки  
змещується при товщинах ПЛБ більш ніж 10 нм, що призводить до  
значного порушення морфології плівки.

З приведених результатів найбільш ймовірним механізмом дво-  
вимірного впорядкування першого шару молекул  $C_{60}$  на поверхні  
 $Cd_{1-x}Hg_xTe$  (III) є наявність атомних сходинок на грані (III).  
Такі сходинок з переважною орієнтацією (II2) можуть викликати  
перебудову доменної структури МШ у процесі переносу його на  
підкладинку. Внаслідок цього виникає структура ПЛБ з узгодженим  
розташуванням доменів, яка і дає картину ДПЕ.

Головні результати виконаної роботи можна сформулювати так:

1. Докладно розглянуто та критично проаналізовано існуючі на цей  
час літературні дані, що стосуються атомарно-чистої поверхні  
 $Si(110)$ -“16x2” та адсорбції на ній різних хімічних елементів.  
Розглянуто також результати робіт у новому напрямку розвитку  
електроніки - нанесенні шарів органічних сполук на поверхні  
твердих тіл.

2. Здійснено детальне дослідження розподілу поверхневих електрон-  
них станів у забороненій зоні та поверхневого вигину зон поверх-  
ні кремнію (110) з власної суперструктуров “16x2”.

3. Визначено вплив адсорбції Al, Pb, Sb на структуру та розподіл  
поверхневих електронних станів поверхні  $Si(110)$ -“16x2” при кім-  
натній температурі останньої. На підставі отриманих результатів  
запропоновано моделі поверхневих структур:  $Al(1x1)RT$ ,  
 $Si(110)-(1x1)Pb$ .

4. Результати досліджень кінетики фотопровідності адсорбційних

систем: Si(IIО)+Al, Si(IIО)+Pb показали, що причиною сильного послаблення поверхневої рекомбінації на частково упоряднених поверхневих фазах вказаних систем є значні зміни у розподілі поверхневих електронних станів поверхні кремнію, які відбувались при адсорбції Al та Pb.

5. З погляду на тенденції подальшого розвитку електроніки проведено експерименти з нанесенням органічних шарів на традиційні напівпровідникові матеріали. Зокрема, за технологією плівки Ленгмюра - Блоджетт наносились бішари стеаринової кислоти на поверхні: Si(III), GaAs(IIО) та Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te(III). Показано, що фізико-хімічний стан підкладки при цьому відіграє суттєву роль у створенні двовимірно впорядкованих органічних шарів на напівпровідниках.

#### СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Юнович А.Э. О кинетике поверхностных явления в полупроводниках при больших изменениях потенциала поверхности / Поверхностные свойства полупроводников. // М.: Изд-во АН СССР, -1962. -127 с.
2. Нестеренко Б.А., Снитко О.В. Физические свойства атомарно-чистой поверхности полупроводников // Киев: Наук. думка, -1983. -264 с.
3. A. I. Shkrebtii, C. M. Bertoni, R. Del Sole and B. A. Nesterenko Structural models of reconstructed Si(IIО) Surface Phases // Surf. Sci. -1990. -~~230~~ -P. 227.
4. Pandey K. C., Freeouf J. L., Eastman D. E. Photoemission and band-structure studies of the GaAs (IIО) // JVST. -1977. -4, N 4. - P. 904-909.
5. Zotov A. V., Lifshits V. G. and A. N. Demidchik. Ordered surface phases in Sb/Si(IIО) system // Surf. Sci. Lett. -1992. -~~274~~ -P. L583-L587.
6. Henzler M. LEED investigation of step arrays on cleaved germanium (III) surfaces // Surf. Sci. -1970. -19, -P. 159.
7. Нестеренко Б. А., Миленин В. В., Зражевский В. А., Горкун О. Ю., Структура и химический состав поверхности эпитаксиальных пленок Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te // УФЖ. -1987. -32, N 9, -С. 1248-1254.

Головні результати дисертації викладено в роботах:

1. B. A. Nesterenko, V. V. Milenin, O. Yu. Gorkun, A. A. Stadnik, Z. I. Kazantseva and A. V. Nabok Two-dimensional ordered stearic acid films on Cd, Hg, Te (III) substrates// Thin Solid Films.-1991.-201, -P. 351-359.
2. B. A. Nesterenko, V. V. Milenin, O. Yu. Gorkun, A. A. Stadnik, Z. I. Kazantseva and A. V. Nabok 2D ordered stearic acid films on semiconductor substrates// Тези V міжнар. конф. "LB-5" -GP9- Париж, 1991.
3. Нестеренко Б. А., Миленин В. В., Горкун О. Ю., Стадник А. А., Казанцева З. И., Набок А. В. Изучение начальных стадий формирования лентгмюровских слоев на полупроводниковых подложках// Тезисы симпозиума "Эмиссия с поверхности полупроводников в том числе экзон-эмиссия", Львов, 1989, -С 32.
4. B. A. Nesterenko, A. A. Stadnik, G. Le Lay, V. Yu. Aristov, N. Safta, J.-P. Lacharme and C. A. Sebenne Si(II0)-"16x2"+Pb System: Atomic Structure and Electron Spectra // Phys. Low-Dim. Struct. -1994. -3, -P. 1-8.
5. Nesterenko B., Stadnik O. A., Surface electronic states in fundamental gap of the clean and group III-V doped Si(II0) surface //Surface Sci -1995. -331 333, -P. 1262-1268.
6. B. Nesterenko, O. Stadnik, A. Cricenti, G. Le Lay, C. A. Sebenne Recombination properties of clean "16x2" and Pb- and Al- doped (II0) silicon surfaces// буде надруковано в Surface Sci. Lett.
7. Нестеренко Б., Саченко А. В., Стадник О. А. Вплив адсорбції атомів Al та Pb на кінетику фотопровідності поверхні Si(II0)-"16x2" // буде надруковано в УФЖ.

Stadnyk O.A. The interconnection of electrophysical and structural characteristics of semiconductor surfaces under adsorption of III-V groups element and organic layers. Candidate of the physico-mathematical sciences ( field 01.04.07-solid state physical ). Thesis (typescript). Institute of Semiconductor Physics of the Sciences of Ukraine, Kiev, 1996. The defended results are present in 5 scientific papers ( 2 of them - to be published ) and 2 conference abstracts.

The surface electron spectra (SES) in the fundamental gap (FG) of the clean Si(110)-"1x2" face was studied for the first time. It was established that SES contained two band ( empty and filled ) which were divided by the energy interval  $E_{g_s} = 0.4$  eV. The surface band bending corresponded to the exhaustion of the space layers on the majority carriers.

The adsorption of 1-2 monolayers of Al, Pb and Sb on the Si(110)-"1x2" phase at room temperature leads to formation of partially ordered systems. The strong effect of Al and Pb adsorption on the SES has been revealed. Namely Al pushes the surface bands to the FG edges making FG practically free of electron states (  $E_{g_s} = 0.8$  eV ). Otherwise, Pb adsorption creates only one half-filled band ( discrete level ) close to the Fermi level position. The further annealings gave ordered structures (1x9)Al, (1x1)Pb and (2x1)Sb on the Si(110) surface. The photoconductivity kinetics data indicated the practically total elimination of the surface recombination on the Si(110)-Al and Si(110)-Pb systems obtained at room temperature.

The investigations of stearic acid bilayers transferred with Langmuir-Blodgett method on the Si(111) surface ( strong oxidized ), GaAs(110) ( weakly oxidized ) and  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( III ) ( atomically clean ) indicated the essential role of the substrate conditions in the layer structure formation. Actually 2-dimensional long ordering was observed on the clean and chemically passive  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( III ) substrates.

Стадник А.А. Взаимосвязь электрофизических и структурных характеристик поверхностей полупроводников при адсорбции на них элементов III-V групп и органических слоев. Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела. Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев, 1996. Защищаются результаты, изложенные в 5 научных статьях (2 находятся в печати) и 2 тезисах.

Впервые исследован спектр поверхностных электронных состояний (ПЕС) запрещенной зоны (ЗЗ) чистой поверхности Si(110), характеризующейся реконструкцией "1x2". Установлено, что он состоит из двух зон - пустых и заполненных ПЕС, разделенных энергетическим промежутком  $E_{g,s} = 0,4$  эВ. Поверхностный изгиб зон при этом соответствует обеднению поверхности на основные носители.

Адсорбция 1-2 монослоев Al, Pb, Sb на структуру Si(110)-"1x2" при комнатной температуре последняя ведет к образованию частично упорядоченных фаз. Обнаружено, что адсорбция Al и Pb сильно изменяет распределение ПЕС в ЗЗ. Al раздвигает зоны ПЕС к краям ЗЗ, делая ее почти свободной ( $E_{g,s} = 0,8$  эВ) от них. Pb, наоборот, формирует одну полузаполненную зону (дискретный уровень) вблизи уровня Ферми. Последующие прогревы ведут к образованию упорядоченных структур: (1x3)Al, (1x1)Pb, (2x3)Sb на поверхности Si(110). Данные по кинетике фотопроводимости свидетельствуют о практически полном подавлении канала поверхностной рекомбинации в системах Si(110)-Al и Si(110)-Pb, полученных при комнатной температуре подложки.

Исследование бислоев стеариновой кислоты, нанесенных методом Ленгмюра-Блоджетт на поверхности Si(111) (сильно окисленная), GaAs(110) (слабо окисленная),  $Cd_xHg_{1-x}Te$ (111) (атомарно чистая) показало существенную роль состояния подложки в формировании структуры органической пленки. В частности двумерный дальний порядок впервые наблюдался на атомарно-чистых, химически пассивных подложках  $Cd_xHg_{1-x}Te$ (111).

Ключові слова: фізика, тверде тіло, напівпровідник, монокристал, кремній, атомарно-чиста поверхня, структура, поверхневі електронні стани, адсорбція, органічні шари.

Підп. до друку 27.09.96. Формат 60×84/16. Папір офс. 1. Друк. офс.  
Друк. офс. Умовн. друк. арк. 4.0. Обл.-вид. арк. Тир. 400  
Зам. 6-1605.

---

Київська книжкова друкарня наукової книги. Київ, Б. Хмельницького, 19

437114

**AB 36.055**