

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МОНОКРИСТАЛІВ

Сіпатов Олександр Юрійович

УДК 621.315.5; 621.36;
535.37; 539.2; 539.23

ЕПІТАКСІАЛЬНІ НАДГРАТКИ ТА КВАНТОВІ СТРУКТУРИ З МОНОХАЛЬКОГЕНІДІВ
СВИНЦЮ, ОЛОВА, ЄВРОПІЮ ТА ІТЕРБІЮ

01.04.10 – Фізика напівпровідників і діелектриків

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2006 р.

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
член-кореспондент НАН України
Пузіков В'ячеслав Михайлович,
Інститут монокристалів НАН України,
директор інституту

доктор фізико-математичних наук, професор
Стасюк Зиновій Васильович,
Львівський національний університет
імені Івана Франка,
завідувач кафедри фізичної та біомедичної електроніки

доктор фізико-математичних наук, професор
Фінкель Віталій Олександрович,
Національний науковий центр НАН України
„Харківський фізико-технічний інститут”,
начальник лабораторії фізичного матеріалознавства функціональних
керамік

Провідна установа: Інститут фізики напівпровідників НАН України,
відділення фізико-технологічних проблем напівпровідникової інфрачервоної
техніки, м. Київ.

Захист відбудеться "18" жовтня 2006 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 64.169.01 при Інституті монокристалів НАН України

Адреса: 61001, м. Харків, пр. Леніна, 60

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту монокристалів НАН України за
адресою: м. Харків, пр. Леніна, 60

Автореферат розісланий " 13 " 09 _____ 2006 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради,

кандидат фізико-математичних наук

Добротворська М.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Синтез нових матеріалів, дослідження їх структури та властивостей є одним з найбільш актуальних питань фізики напівпровідників та діелектриків. Одним з найперспективніших об'єктів дослідження є надгратки (НГ), що являють собою багатошарові структури з періодичним чергуванням тонких шарів різних матеріалів, які створюють додатковий модулюючий потенціал для носіїв заряду. Маючи унікальні властивості, НГ викликають підвищений інтерес як для фундаментальних досліджень, так і для їх практичного використання. Основними вимогами до матеріалів для створення епітаксialьних НГ є: 1) пошаровий ріст матеріалів один на одному, 2) різна величина їх заборонених зон, 3) мала невідповідність періодів їх ґрат. Тому одним з актуальних питань для творців НГ є пошук матеріалів, що відповідають цим вимогам. За останні десятиріччя основні зусилля дослідників і, відповідно, найпомітніші досягнення пов'язані з НГ на основі сполук A^3B^5 та A^2B^6 , для яких проблему малої невідповідності ґрат вирішують за допомогою створення багатокомпонентних бар'єрних шарів. Дослідженням багатошарових структур з великою невідповідністю ґрат суміжних шарів приділяли недостатньо уваги тому, що вважали, що така невідповідність може призводити до напруг, деформацій та дефектів, створюючи додаткові та небажані центри розсіювання для носіїв заряду. Таким чином, проблема створення та дослідження фізичних властивостей НГ на основі багатошарових плівок з великою невідповідністю ґрат шарів на момент постановки задачі даної роботи залишалась невирішеною, що сильно обмежувало як набір матеріалів для створення НГ, так і діапазон їх властивостей.

Вирішення цієї проблеми дозволить суттєво розширити коло можливих надґраткових матеріалів, а невідповідність ґрат суміжних шарів відкриває нові можливості у створенні НГ з однорідно- та неоднорідно-пружньодеформованими шарами, з періодичними системами дислокацій та ґратами збіжних вузлів на міжфазних межах. Це значно розширює як число структурних станів, так і, відповідно, діапазон варіації фізичних властивостей НГ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Робота виконувалась на кафедрі фізики металів та напівпровідників відповідно до планових завдань науково-дослідного відділу Національного технічного університету "ХПІ" та в рамках міжнародних проектів:

1. "Исследования структурных превращений, физических свойств и процессов деградации металлических, полупроводниковых и диэлектрических пленок, перспективных для технических применений" (номер держреєстрації 0186.0117328, 1987 – 1991 р.р.);

2. "Теоретическая и экспериментальная разработка и комплексные исследования новых долговечных функциональных пленочных материалов с уникальными физическими свойствами для применения в качестве ответственных элементов приборов и устройств новейшей техники" (номер держреєстрації 0193У027850, 1991 – 1993 р.р.);

3. “Розробка фундаментальних проблем фізики тонких плівок і створення стабільних в екстремальних умовах нових матеріалів для елементів електроніки та інших областей науки і техніки” (номер держреєстрації 0194У012927: 1994 – 1996 р.р.; 0196У14669: 1997 – 1999 р.р.);

4. “Інтердифузія в надтонких шарах багатошарових композицій і надрешіток” (номер держреєстрації 0197У001910, 1997-1999 р.р.);

5. “Структура и свойства тонкопленочных конденсированных систем с экстремальными параметрами” (номер держреєстрації 0100У001688, 2000 - 2002 р.р.);

6. “Дослідження наноструктурованих плівок та композицій на їх основі” (номер держреєстрації 0103U001534, 2003 - 2005 р.р.)

7. “New low dimensional AIVBVI semiconductor structures with high thermoelectric performance” (INTAS-проект № 96-0535, 1997 – 2000 г.г.);

8. “Studies of ferromagnetic semiconductor superlattices based on IV-VI compounds by neutron and synchrotron radiation scattering” (CRDF-проект № UP2-2444-KH-02, 2002 – 2004 р.р.).

Мета і задачі дослідження.

Мета даної роботи – встановлення закономірностей та ефектів, пов’язаних з переходом до низьковимірного стану епітаксіальних надграток з халькогенідних напівпровідників з невідповідністю ґрат суміжних шарів. Для досягнення поставленої мети передбачалося розв’язати такі задачі:

1. Встановлення особливостей і закономірностей епітаксіального росту та структури халькогенідних напівпровідників на різних підкладках та один на одному в залежності від невідповідності ґрат суміжних шарів.

2. Дослідження термічної та часової стабільності багатошарових структур з халькогенідних напівпровідників.

3. Встановлення особливостей і закономірностей електричних, оптичних та магнітних властивостей надграток, а також їхнього взаємозв’язку зі структурою.

Об’єкт дослідження – ефекти та фізичні явища, пов’язані з переходом напівпровідникової системи до низьковимірності.

Предмет дослідження - надгратки з халькогенідів свинцю, олова, європію та ітербію з невідповідністю ґрат шарів у широких межах (від 0,5 % до 13 %), та їхні електричні, оптичні і магнітні властивості.

Методи дослідження. Зразки виготовлялись в високовакуумній установці резистивним випаровуванням халькогенідів свинцю та олова з вольфрамових човників та електронно-променевим випаровуванням халькогенідів рідкісноземельних металів. Багатошарові плівки синтезувались шляхом послідовної конденсації халькогенідів на свіжозколоті підкладки лужно-галоїдних кристалів. Товщина шарів та швидкість конденсації контролювались за

допомогою відкаліброваного кварцового резонатора. Для структурних досліджень використовувались методи електронної мікроскопії, рентгенівської та нейтронної дифракції, а при дослідженні фізичних властивостей використовувався комплекс сучасних низькотемпературних методів вимірювання оптичних, електричних та магнітних характеристик.

Наукова новизна отриманих результатів складається з таких вперше встановлених положень:

1. Для двовимірних дислокаційних надграток виявлено надпровідність в багат шарових структурах з халькогенідів свинцю, олова, європію та ітербію, яка пов'язана з присутністю періодичних сіток дислокацій невідповідності (ДН) на міжфазних межах (за відсутності дислокацій надпровідність не спостерігається). Збільшення густини ДН (зменшення періоду сітки ДН) призводить до збільшення температури надпровідного переходу.

2. Створено тривимірні надгратки з модуляцією структури впорядкованими дислокаційними сітками в площині композиції та модуляцією складу в ортогональному напрямку, для яких виявлені лінії фотолюмінесценції, що відповідають випромінюванню з квантових точок.

3. Для одновимірних композиційних надграток EuS-PbS виявлено резонансне тунелювання електронів через тонкі бар'єри EuS (2 - 6 нм), що робить вольт-амперні характеристики таких структур нелінійними з появою на них ділянок з від'ємною диференційною провідністю. Встановлено, що провідність таких структур змінюється при переході бар'єрних шарів у феромагнітний стан, причому знак цієї зміни залежить від взаємної орієнтації намагніченостей сусідніх шарів EuS.

4. Для одновимірних напівпровідникових надграток виявлено антиферомагнітне впорядкування магнітних шарів (намагніченості сусідніх шарів EuS направлені в протилежному напрямку), зумовлене взаємодією феромагнітних шарів EuS через діамагнітні прошарки PbS та YbSe. Таке впорядкування спостерігається для незвично великого діапазону товщини прошарків вузькозонного напівпровідника PbS (від 0,4 до 40 нм) та широкозонного YbSe (від 1 до 3 нм), що суттєво відрізняє напівпровідникові надгратки від металевих.

5. Встановлено магнітну анізотропію в площині шарів надграток та виявлені особливості їхньої доменної структури. Показано, що намагніченості доменів в надгратках EuS-YbSe та EuS-PbS лежать вздовж різних напрямків в площині шарів, а саме, вздовж осей легкого намагнічення типу $\langle 110 \rangle$ та $\langle 210 \rangle$, відповідно.

6. Встановлено залежність енергії антиферомагнітної взаємодії в надгратках EuS-PbS від температури та товщини немагнітного прошарку (спостерігається її зменшення зі збільшенням товщини прошарків та температури). Константа міжшарової обмінної взаємодії має степеневу залежність від намагніченості шарів з показником степеня, який залежить від товщини EuS.

Практичне значення отриманих результатів визначається розв'язанням поставленої задачі по створенню епітаксціальних надграток на основі багат шарових плівкових композицій з невідповідністю грат суміжних шарів в широких межах, що суттєво розширює коло надграткових матеріалів та відкриває широкі можливості як для фундаментальних досліджень, так і для розробки нових функціональних елементів мікроелектроніки, НВЧ- та ІЧ- техніки. Відкриті нові надпровідні структури - дислокаційні надгратки можуть бути використані в якості зручних об'єктів для моделювання високотемпературних надпровідників (ВТНП) з добре контрольованою зміною їх структурних параметрів. Розроблено оригінальну методику вирощування монокристалічних плівок халькогенідів свинцю та олова на промислових кремнієвих підкладках з використанням буферних шарів з халькогенідів рідкісноземельних металів. Визначені коефіцієнти взаємодифузії матеріалів шарів надграток дозволяють оцінити час життя функціональних елементів на їх основі. На основі НГ з халькогенідних сполук можна створювати ІЧ-лазери з широким діапазоном довжини хвилі випромінювання, величина якої буде визначатися товщиною квантової ями. Можливість керування впорядкуванням намагніченостей сусідніх шарів EuS в надгратках та його перемикання від антиферомагнітного до феромагнітного за допомогою зовнішнього магнітного поля робить такі структури вельми перспективними для спінтроники (спін-поляризованої електроніки) з можливістю контролю не лише величини струму носіїв заряду, але і їх спінового стану.

Особистий внесок здобувача. В опублікованих статтях [1-52] автор безпосередньо брав участь у формуванні напрямків дослідження, постановці задач, обробці експериментальних результатів, а також в формулюванні висновків. Безпосередньо автором були виготовлені всі зразки та досліджена їх структура за допомогою електронної мікроскопії та рентгенівської дифракції. У співпраці з колегами з інших організацій автор брав участь у дослідженнях електричних [2,4,7,9-16,18-21,23-24,32,35-38,41,44-45,52], оптичних [1,5-6,17,29] та магнітних [25,30,33-34,40,47-48,50] властивостей зразків, у тому числі за допомогою дифракції нейтронів [39-40,43,46,49,51], а також у дослідженнях взаємодифузії [26,28,31,42]. Конкретний внесок співавторів в опублікованих роботах наведено у примітці до дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи були представлені та доповідались на: 13-й Всесоюзній конференції з електронної мікроскопії, Суми, 1987 р.; 9-й Всесоюзній конференції з фізики напівпровідників, Кишинів, 1988 р.; 8-й Міжнародній конференції з потрійних та багатокомпонентних сполук, Кишинів, 1990 р. (8 Int. Conf. On Ternary and Multinary Compounds, Kishinev, 1990); 7-й Міжнародній конференції з вузькозонних напівпровідників, Саутгемптон, Англія, 1992 р. (7 Int. Conf. of Narrow-Gap Semiconductors, Southampton, 1992); 8-й Міжнародній конференції з вузькозонних напівпровідників, Санта-Фе, США, 1995 г. (8 Int. Conf. of Narrow-Gap Semiconductors, Santa-Fe, USA, 1995); 21-й Міжнародній конференції з фізики низьких температур, Прага, Чехія, 1996 р. (21-st Int. Conf. on Low Temperature Physics, Prague, 1996); IV

Міжнародній конференції “Матеріалознавство та властивості матеріалів для інфрачервоної електроніки”, Київ, 1998 р. (IV Int. Conf. “Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics”, Kyiv, 1998); Міжнародному семінарі “Дифузія та дифузійні фазові перетворення у сплавах”, Черкаси, 1998 р. (Int. Workshop “Diffusion and diffusional phase transformations in alloys”, Cherkasy, 1998); 18-ой Міжнародній конференції з термоелектрики, Балтимор, США, 1999 р. (18-th Int. Conf. on Thermoelectrics, Baltimore, USA, 1999); 2-й Міжнародній конференції з фізики та використання спінових явищ у напівпровідниках, Вюрцбург, Німеччина, 2002 р. (2-nd Int. Conf. on Physics and Application of Spin Related Phenomena in Semiconductors, Wurzburg, Germany, 2002); 16-й Міжнародній конференції з магнетизму, Рим, Італія, 2003 р. (16 Int. Conf. on Magnetism, Rome, Italy, 2003); на міжнародному симпозиумі “Нанofізика та нанoeлектроніка”, Нижній Новгород, Росія, 2005 р.

Публікації. За темою та матеріалами дисертації опубліковано 64 роботи. З них 52 статті в спеціалізованих наукових журналах, 12 тез доповідей на конференціях.

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел (422 джерела). Вона містить 313 сторінок, 11 таблиць і 126 рисунків, а також 1 примітку.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності обраної теми дослідження та необхідності його проведення, сформульована проблема та визначена мета і задачі роботи, вказані об’єкт та предмет дослідження і методи синтезу НГ та їх атестації. Відзначено зв’язок роботи з науковими планами та програмами, наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

В першому розділі наведено огляд публікацій з напівпровідникових надграток, в якому відзначено, що надгратки являють собою новий клас штучних напівпровідникових структур з керованим зонним спектром носіїв заряду. Цілеспрямовано змінюючи склад та структуру НГ, можна прогнозовано змінювати їх енергетичну зонну структуру та отримувати унікальні фізичні властивості, недосяжні для звичайних кристалів та плівок. В обзорі вказано, що за останні десятиріччя основні зусилля дослідників та, відповідно, найпомітніші досягнення пов’язані з НГ на основі сполук A^3B^5 та A^2B^6 , для яких проблему малої невідповідності ґрат вирішують за допомогою створення багатокомпонентних бар’єрних шарів. Дослідженням багатошарових структур з великою невідповідністю ґрат суміжних шарів приділяли недостатньо уваги тому, що вважали, що невідповідність може призводити до деформацій та дефектів, які будуть додатковими та небажаними центрами розсіювання для носіїв заряду. Таким чином, проблема створення та дослідження фізичних властивостей НГ з ненульовою невідповідністю ґрат шарів на момент

постановки задачі даної роботи залишалась невирішеною, що сильно обмежувало як набір матеріалів для створення НГ, так і діапазон їх властивостей. Тому основним напрямком даної роботи було обрано дослідження особливостей формування структури та фізичних властивостей епітаксіальних НГ та квантових структур на основі багат шарових плівкових композицій з невідповідністю ґрат шарів в широких межах (0,5 - 13 %).

В другому розділі описано методики створення та дослідження плівок і надґраток з халькогенідних напівпровідників. Зразки виготовлялись в спеціалізованій високовакуумній установці с безмасляною системою відкачки (до 10^{-7} Па) резистивним випаровуванням халькогенідів свинцю та олова з вольфрамових човників і електронно-променевим випаровуванням халькогенідів рідкісноземельних металів. Багат шарові плівки синтезувались шляхом послідовної конденсації халькогенідів на свіжозколоті підкладки лужно-галоїдних кристалів при температурі 473-523 К. Товщина шарів та швидкість конденсації контролювались за допомогою відкаліброваного кварцового резонатора з точністю до 0,1 нм. Для структурних досліджень використовувались методи електронної мікроскопії, рентгенівської та нейтронної дифракції. При дослідженні фізичних властивостей використовувався комплекс сучасних низькотемпературних методів (фотолюмінесценція, мікроконтактна спектроскопія, SQUID-магнітометрія, феромагнітний резонанс) вимірювання оптичних (спектри люмінесценції), електричних (провідність, коефіцієнт Холла, магнітоопір) та магнітних (намагніченість, анізотропія) характеристик.

Стабільність надґраток та процеси взаємодифузії в них досліджувались за допомогою рентгенівської дифракції за зміною інтенсивності рефлексів-сателітів в процесі дифузійних відпалів зразків.

Третій розділ "Епітаксіальний ріст та структура плівок і надґраток халькогенідних напівпровідників" присвячено дослідженню особливостей епітаксіального росту та структури багат шарових плівок з невідповідністю ґрат суміжних шарів в широких межах. В якості матеріалів для дослідження було обрано халькогеніди свинцю, олова та рідкісноземельних металів (РЗМ), які: по-перше, на момент постановки задачі були найменше дослідженими надґратковими матеріалами; по-друге, дають широкий набір халькогенідних сполук з ізоморфними кристалічними ґратами, але різними періодами, концентраціями та енергетичними спектрами носіїв заряду. Це дає можливість створення багат шарових композицій з невідповідністю ґрат шарів в широких межах (від 0,5 % до 13 %) та комбінацією шарів з вузькозонних, широкозонних, феромагнітних, діамагнітних матеріалів (Табл.1) і створює добрі перспективи для пошуку нових явищ та ефектів у таких структурах.

Таблиця 1.

Період ґрат (a), ширина забороненої зони (E_g), температура плавлення (T_m), температура Кюрі (T_K) та температура Нееля (T_N) халькогенідних сполук.

Матеріали	a, нм	E _g , eV	T _m , °C	T _K , (T _N), K
PbS	0,5936	0,41	1113	
PbSe	0,6126	0,29	1080	
PbTe	0,6450	0,32	923	
SnTe	0,6330	0,18	806	
YbS	0,5658	1,7	2230	
YbSe	0,5879	2,0	2210	
YbTe	0,6366	1,9	1930	
EuS	0,5965	1,65	2560	16,5
EuSe	0,6188	1,8	2213	2,8 (4,6)
EuTe	0,6585	2,0	1983	(9)

Для отримання унікальних властивостей НГ необхідно реалізувати пошаровий ріст використовуваних матеріалів один на одному у вигляді монокристалічних шарів достатньо доброї якості. Необхідно також підібрати підкладки для отримання на них монокристалічних плівок обраних матеріалів з необхідною досконалістю кристалічної структури. Тому, перш за все, були проведені дослідження особливостей епітаксialного росту даних матеріалів на різних підкладках.

Відомо, що для халькогенідів свинцю та олова найбільш оптимальними являються підкладки KCl та BaF₂, на яких вони ростуть у вигляді монокристалічних плівок в орієнтації (001) та (111) відповідно. Електронно-мікроскопічні та рентгенівські дослідження епітаксії халькогенідів РЗМ показали, що вони на цих підкладках ростуть у вигляді полікристалічних, у кращому разі текстурованих плівок. Монокристалічні шари халькогенідів ітербію можна отримати тільки на підкладках кремнію за температур 1173 - 1223 К. При більш низьких температурах (~ 523 К) монокристалічні плівки халькогенідів РЗМ можна вирощувати на монокристалічних плівках халькогенідів свинцю та олова, завдяки реалізації пошарового механізму їх росту один на одному.

В багат шарових структурах з халькогенідів свинцю, олова, ітербію та європію за невідповідності параметрів ґрат шарів $f > 2\%$ на (001) міжфазній межі формуються ортогональні ряди крайових дислокацій невідповідності (ДН) (Рис. 1). Підбираючи пари матеріалів з різною величиною невідповідності їх параметрів ґрат ($f = 13 - 2\%$), можна змінювати період сітки ДН в широких межах ($D_{ДН} = 3,3 - 23$ нм) (Табл. 2).

Рис. 1. Електронно-мікроскопічні зображення (ліворуч) та електроннограми (праворуч) плівок YbS-PbSe (а), YbS-PbS (б) та YbSe-PbSe (в). ДН - дислокації невідповідності. ДР - дислокаційні рефлекси.

Для орієнтації (111) є можливість керування дислокаційними структурами шляхом зміни ступеню вакууму. Для цієї орієнтації сітки ДН формуються тільки при вирощуванні багат шарових структур в умовах високого вакууму ($P_{\text{ост}} < 10^{-7}$ Па). Погіршення вакууму ($P_{\text{ост}} > 10^{-6}$ Па) призводить до зміни механізму росту від пошарового до островкового, в результаті чого виростають монокристалічні плівки халькогенідів без ДН на міжфазних межах (111).

ДН компенсують невідповідність решіток суміжних шарів і локалізують напруги та деформації, викликані цією невідповідністю, поблизу міжфазної межі у вигляді періодичних модуляцій. Величина дислокаційних напруг достатня для модуляції забороненої зони напівпровідника і, враховуючи високу регулярність та періодичність ДН (на яких можна спостерігати дифракцію електронів – появу дислокаційних рефлексів на електроннограмах), їх можна розглядати як новий тип двовимірних надграток з періодичною модуляцією структури в міжфазній площині.

Таблиця 2.

Розрахункові значення невідповідності (f), періоду ДН (D) та експериментальні значення критичної товщини введення ДН (h_c) і мінімальної товщини шарів для формування надграток (h_m).

CP	f, %	D, нм	h _c , нм	h _m , нм
EuS-PbS	0,5	-	-	0,6
YbTe-SnTe	0,6	-	-	0,8
EuSe-PbSe	0,9	-	-	1,0
YbSe-PbS	0,9	-	-	1,0
EuTe-PbTe	2,0	23,0	15	1,2
PbTe-SnTe	2,1	23,0	12	1,4
EuS-PbSe	2,5	20,0	10	1,5
PbSe-PbS	3,1	13,0	8	1,5
SnTe-PbS	3,3	13,0	7	1,6
EuSe-PbS	4,0	12,0	6	1,8
YbSe-PbSe	4,1	10,0	5	2,0
EuSe-PbTe	4,4	10,0	4	2,0
YbS-PbS	4,8	8,5	3	2,0
PbTe-PbSe	5,3	8,4	3	2,0
EuTe-PbSe	7,2	6,2	2	3,0
EuS-PbTe	7,7	5,7	1	3,0
YbS-PbSe	7,9	5,2	1	3,5
PbTe-PbS	8,3	5,2	1	3,5
YbSe-PbTe	9,2	4,7	1	4,0
EuTe-PbS	10,0	4,3	1	4,0
YbS-PbTe	13,0	3,3	1	5,0

Одним з найбільш ефективних методів контролю періодичних структур є рентгенівська дифракція, коли на дифрактограмах багат шарових структур замість бреггівських рефлексів від кожного матеріалу з'являється інтерференційна картина когерентного розсіювання, що складається з рефлексів-сателітів (Рис.2.а), відстань між якими визначається періодом НГ.

Біля первинного пучка спостерігається аналогічна система піків-сателітів, положення яких також визначається періодом НГ, але з урахуванням заломлення, яке стає значним при малих кутах. При дослідженнях багат шарових структур “на просвіт” можна визначити товщину шарів, при якій спостерігається зрив псевдоморфізму (або введення ДН) за розщепленням псевдоморфного рефлексу на два окремих, що відповідають кожному шару. Таким чином можна визначити критичну товщину шарів для формування ДН, що і було зроблено для кожної пари матеріалів, а результати наведені в Табл. 2. В цій же таблиці наведені значення мінімальної товщини шарів, за якої можливо створення надграток, що визначалося за присутністю рефлексів-сателітів першого порядку.

Рис. 2. Криві рентгенівської дифракції поблизу рефлекса (200) для НГ PbSe-PbS з періодом 20 нм в початковому стані (а) та після відпалу при температурі 543 К на протязі 10 годин (б) та 78 годин (в). S_n - рефлекси-сателіти.

Результати структурних досліджень систематизовані і представлені у вигляді наступного узагальнення. На основі халькогенідних напівпровідників реалізовані три типи надграткових наноструктур:

- Одновимірні (композиційні) надгратки, які синтезуються при малих невідповідностях і товщинах шарів, менших критичних для введення ДН.
- Двовимірні (дислокаційні) надгратки, при великих невідповідностях і товщинах шарів, більших критичних для введення ДН.
- Тривимірні (дислокаційно-композиційні) надгратки, що є комбінацією перших двох.

Четвертий розділ “Взаємодифузія в надгратках”. Надгратки відкривають широкі можливості як для фундаментальних досліджень, так і для створення нових функціональних елементів мікроелектроніки, ІЧ-техніки, оптоелектроніки. Для таких структур з надтонкими шарами важливе значення має стан міжфазних меж - їх шорсткість, різкість переходу від одного шару до іншого, наявність та величина перемішаних зон, а також часова та температурна стабільність їхньої структури і властивостей.

Дифузійні процеси у таких надтонких шарах з великим градієнтом концентрацій елементів можуть мати свої особливості та відрізнятися від масивного стану. Тому дослідження взаємодифузії матеріалів шарів у надгратках має важливе значення як у теоретичному, так і у практичному аспектах. Великий градієнт концентрацій на таких малих відстанях може призвести до швидкого перемішування шарів і деградації надграток вже на стадії їх виготовлення. Тому виникає необхідність атестації НГ за величиною та ступенем перемішаних зон, що формуються у процесі їх виготовлення при температурі росту (~ 523 K).

У розділі наведено аналіз сучасних методів дослідження інтердифузії у періодичних багат шарових структурах, який показує, що для епітаксціальних НГ одним з найбільш ефективних методів є рентгенівська дифракція на бреггівських відбиттях. Цей метод дозволяє за зміною інтенсивності рефлексів-сателітів не тільки прослідкувати процеси перемішування шарів, але й визначити коефіцієнти їхньої взаємодифузії:

$$\ln[I_n(\tau_2)/I_n(\tau_1)] = - 8n^2\pi^2D(\tau_2-\tau_1)/H^2, \quad (1)$$

де D - ефективний коефіцієнт дифузії; H - період НГ; n - порядок рефлекса-сателіта; I_n - відносна інтенсивність рефлекса-сателіта n -го порядку, нормована на інтенсивність рефлекса нульового порядку; τ - час відпалу.

Враховуючи закон Арреніуса ($D = D_0 \exp(-E_A/kT)$), можна визначити значення енергії активації E_A та передекспоненційного множника D_0 , розрахувати коефіцієнт взаємодифузії для будь-якої необхідної температури та оцінити величину перемішаної зони (ΔX) на міжфазній межі за час τ : $\Delta X \sim 2(D\tau)^{1/2}$. Для розв'язання даної задачі були проведені серії дифузійних відпалів надграток у вакуумі за різних температур. Періодично, після кожного відпалу, проводили рентгенівські дослідження зразків. Результати проведених досліджень показують, що в процесі відпалу інтенсивність бічних рефлексів-сателітів зменшується, а центрального (нульового) зростає, що свідчить про взаємне перемішування матеріалів шарів, наприклад для НГ PbSe-PbS (Рис.2).

На логарифмічних залежностях інтенсивності від часу відпалу, представлених на рис.3, видно, що маємо два типи дифузії - швидка (на початкових етапах відпалів) та повільна.

Рис. 3. Зміна відносної інтенсивності рефлексів-сателітів першого (S_1) та другого (S_2) порядків відбиття з часом відпалу при температурі 543 К для НГ PbSe-PbS з періодом 20 нм.

Використовуючи співвідношення (1) для НГ PbSe-PbS були визначені коефіцієнти взаємодифузії шарів, значення яких становлять:

для швидкої дифузії $D = 3,6 \times 10^{-19} \text{ см}^2/\text{с}$ (543 К); $2 \times 10^{-18} \text{ см}^2/\text{с}$ (593 К); $4,9 \times 10^{-18} \text{ см}^2/\text{с}$ (623 К);
для повільної $D = 1,6 \times 10^{-20} \text{ см}^2/\text{с}$ (543 К); $4 \times 10^{-19} \text{ см}^2/\text{с}$ (593 К); $2,15 \times 10^{-18} \text{ см}^2/\text{с}$ (623 К);

За законом Арреніуса були визначені енергія активації E_A та передекспоненційний множник D_0 для етапів швидкої та повільної дифузії:

для швидкої: $D_0 = 2,4 \times 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$; $E_A = 0,95 \text{ еВ}$;

для повільної: $D_0 = 5,3 \times 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$; $E_A = 1,78 \text{ еВ}$.

Швидка дифузія на початкових етапах відпалів пов'язана з присутністю нерівноважних нестехіометричних точкових дефектів в халькогенідах свинцю, про що свідчить низьке значення енергії активації ($E = 0,95 \text{ еВ}$).

Величина перемішаної зони шарів НГ при температурі її синтезу (523 К) складає $\Delta X \sim 0,4 \text{ нм}$ ($\tau = 1 \text{ година}$), що відповідає 1 моношару.

Аналогічні дослідження були проведені для інших систем і отримані результати представлені у Таблиці 3.

Слід зазначити, що для НГ с халькогенідами РЗМ перемішування шарів відбувається повільніше, коефіцієнти взаємодифузії при тих же температурах

Таблиця 3.

Дифузійні характеристики НГ. f - невідповідність ґрат шарів; H – період НГ; h_i – товщина шару; T – температура відпалу; D – коефіцієнти дифузії; D_0 – передекспоненційний множник; E_a – енергія активації; $D_{523 \text{ К}}$ – коефіцієнт дифузії при 523 К; ΔX – величина перемішаної зони при 523 К за 1 годину.

СР	f ,	H (h_1+h_2), нм	T , К	D ,	D_0 , $\text{см}^2/\text{с}$	E_a ,	$D_{523 \text{ К}}$,	ΔX ,
----	-------	-----------------------	---------	-------	--------------------------------	---------	-----------------------	--------------

	%			см ² /с		эВ	см ² /с	нм
PbSe-PbS	3.1	18 (9+9) 20 (14+6)	543	1.6×10^{-20}	5.3×10^{-4}	1.78	1.6×10^{-19}	0.48
			593	4×10^{-19}				
			623	2.1×10^{-18}				
PbTe-PbSe	5.3	8.6 (4.3+4.3)	543	2.3×10^{-20}	1.6×10^{-6}	1.5	5.6×10^{-21}	0.09
			593	1.9×10^{-19}				
			643	3.1×10^{-18}				
EuS-PbS	0.5	8.0 (4+4)	543	1.1×10^{-20}	2.2×10^{-9}	1.22	3×10^{-21}	0.06
			593	6.4×10^{-20}				
			623	1.7×10^{-18}				
EuS-PbSe	2.5	19 (9.5+9.5) 11.5(10+1.5) 8.6 (6+2.6)	593	7.7×10^{-21}	4.0×10^{-10}	1.26	2.9×10^{-22}	0.02
			693	3.3×10^{-19}				
			733	8.7×10^{-19}				
EuSe-PbS	4.0	14 (7+7)	573	0.8×10^{-18}	1.1×10^{-11}	0.9	2.2×10^{-20}	0.18
			598	1.7×10^{-18}				
			623	3.5×10^{-18}				
EuSe-PbSe	0.9	15 (8+7) 13 (7+6) 16 (8+8)	673	0.5×10^{-18}	9.9×10^{-6}	1.78	7.5×10^{-23}	0.01
			698	1.2×10^{-18}				
			723	4.5×10^{-18}				
PbTe-PbS	8.3	Не перемешиваются до 750 К						
EuS-PbTe	7.7	Не перемешиваются до 750 К						

мають менше значення. Суттєво менша і величина перемішаної зони, яка навіть за 10 годин не перевищує 1 моношару. Дифузійні характеристики досліджених систем не залежать від співвідношення товщин шарів НГ та величини періоду. В системі EuS-PbSe виявлено ефект Кіркендала за зміною положення нульового рефлекса-сателіта у процесі дифузійних відпалів. Особливо слід відзначити системи PbTe-PbS ($f = 8,3\%$) та EuS-PbTe ($f = 7,7\%$), для яких перемішування шарів не спостерігається до температур 733 К, після чого матеріали починають випаровуватися (без перемішування).

Таким чином, синтезовані надгратки у початковому стані являють собою періодичні багатошарові структури, що складаються з монокристалічних шарів халькогенідних напівпровідників з різкими межами розділу і є стабільним структурно-атестованим об'єктом дослідження для пошуку нових явищ та ефектів.

У п'ятому розділі "Фотолюмінесценція надграток" наведено аналіз можливостей оптичних методів для дослідження низьковимірних структур, з якого видно, що одним з найефективніших методів дослідження розмірного квантування енергетичного спектру носіїв заряду в напівпровідниках є фотолюмінесценція (ФЛ). Квантово-розмірні ефекти можна визначати за

змінюючи положення піків люмінесценції при зміні товщини випромінюючого шару та при зміні рівня збудження (або накачки), що і було продемонстровано на спектрах наших зразків, отриманих при збудженні люмінесценції імпульсним Nd-лазером ($\lambda = 1,06$ мкм). Так на залежностях положення довгохвильового краю піків випромінювання від товщини одношарових плівок PbS/(001)KCl спостерігається його збільшення від 260 меВ до 580 меВ при зменшенні товщини від 30 нм до 3 нм. Експериментальні точки добре узгоджуються з розрахунком положення першого рівня розмірного квантування для квантової ями. Аналогічна залежність спостерігається і для НГ EuS-PbS (Рис. 4), де положення експериментальних точок добре узгоджується з розрахунковими залежностями для першого та другого рівней розмірного квантування, отриманими для моделі Кроніга-Пенні (див. вставку на рис. 4).

Рис. 4. Залежність положення довгохвильового краю піків фотолюмінесценції для НГ EuS-PbS від товщини шару PbS. E_i – розрахункові криві положення рівней розмірного квантування. На вставці схематично показана зонна модель НГ.

Найцікавішим є випадок тривимірної НГ PbSe-PbS/(001)KCl, яку можна уявити як набір періодичних квантових “ящиків” (або точок), обмежених в одному напрямку модуляцією складу, а в двох інших напрямках – періодичною модуляцією структури дислокаційними деформаціями. На спектрі люмінесценції такої структури (Рис. 5) присутні три еквідистантні піки (четвертий пік

Рис. 5. Спектри ФЛ тривимірної НГ PbSe-PbS з товщинами шарів по 7 нм.

знаходиться на подвійній відстані по енергії), для яких зі зміною температури (від 5 К до 90 К) не відбувається зміни їх ширини та положення, а спостерігається перекачка інтенсивності між ними. Така поведінка якісно узгоджується з моделлю квантових точок.

Таким чином, за допомогою фотолюмінесценції продемонстрована можливість розмірного квантування енергетичного спектру носіїв заряду як для одновимірних, так і для тривимірних НГ. Спостереження ліній вимушеного випромінювання в спектрах НГ на певних рівнях збудження свідчить про перспективність використання даних НГ у якості активних елементів ІЧ-лазерів з оптичною накачкою.

Шостий розділ "Електрофізичні властивості надграток". Дослідження електричного транспорту у НГ на основі багат шарових структур з широким діапазоном невідповідності параметрів ґрат їхніх шарів показало, що властивості одновимірних (композиційних) та двовимірних (дислокаційних) НГ суттєво різняться. В розділі наведено аналіз можливостей електричних вимірів у НГ, з якого видно, що одним з найбільш яскравих ефектів є резонансне тунелювання при поперечному транспорті. Дослідження поперечного транспорту в багат шарових структурах EuS-PbS показали присутність у них резонансного тунелювання електронів через тонкі бар'єри EuS (2 - 5 нм), що робить вольт-амперні характеристики таких структур нелінійними (Рис.6) з появою на них ділянок від'ємної диференційної провідності (для двобар'єрних структур).

Рис. 6. Вольт-амперна характеристика поперечного транспорту двобар'єрної тунельної структури $\text{EuS}(3 \text{ нм})\text{-PbS}(7 \text{ нм})\text{-EuS}(3 \text{ нм})/(001)\text{PbTe}$ (з площею поперечного перерізу мезаструктури $100 \times 100 \text{ мкм}$) при 77 К , яка отримана при збільшенні (1) та зменшенні (2) напруги.

Встановлено, що провідність таких структур змінюється при переході бар'єрних шарів до феромагнітного стану і знак її зміни визначається взаємною орієнтацією намагніченостей сусідніх шарів EuS . Така зміна провідності пов'язана з обмінним розщепленням зони провідності бар'єрних шарів та спіновою поляризацією електронів, що тунелюють через них. Все це робить дані структури перспективними для спінтроники (спін-поляризованої електроніки) з можливістю контролювати не тільки величину струму носіїв заряду, але і їхній спіновий стан.

Для двовимірних дислокаційних НГ при дослідженні їх подовжніх транспортних властивостей вперше було знайдено надпровідність (НП) у багатошарових структурах з халькогенідів свинцю, олова, європію та ітербію, одношарові плівки яких не мають надпровідних переходів (табл. 4).

Таблиця 4.

Невідповідність параметрів ґрат (f), період дислокацій невідповідності ($D_{\text{дн}}$) і максимальна критична температура НП переходу (T_c) для НГ.

	СР	f , %	$D_{\text{дн}}$, нм	T_c , К
А	PbTe-SnTe	2.0	23	2.9
	PbSe-PbS	3.1	13.6	4.5
	PbTe-PbSe	5.1	8.6	6.02
	PbTe-PbS	8.3	5.2	6.53

B	YbS-PbS	4.8	8.5	5.39
	YbS-PbTe	13	3.3	5.93
C	EuS-PbSe	2.5	17	2.48
	EuS-PbTe	7.7	5.7	5.01
	EuS-PbS	0.5	немає ДН	немає СП
D	YbS-YbSe	3.8	10.6	немає СП
	YbS-EuS	5.3	7.7	немає СП

Надпровідність НГ пов'язана з присутністю регулярних сіток дислокацій невідповідності на міжфазних межах (за відсутності сіток дислокацій надпровідності немає) і має наступні характеристики: температура переходу $T_c = 2 - 6,5$ К; максимальне критичне магнітне поле $H_{c2} = 30 - 40$ кЕ; енергетична щілина (Δ): $2\Delta/kT_c \sim 10$ (рис. 7).

Рис. 7. Температурні залежності енергетичних щілин, отримані з мікроконтактних вимірювань, для тришарових плівок PbS-PbTe-PbS (o) та НГ PbTe-PbS (Δ) з товщинами шарів по 18 нм

Встановлено, що надпровідність дислокаційних НГ має двовимірний характер і локалізована поблизу міжфазних меж. Спарювання електронів відбувається спочатку на вузлах дислокаційної сітки (про що свідчить поява нульвимірної флуктуаційної НП). Надпровідність стабілізується взаємодією сусідніх дислокаційних вузлів (поява двовимірної флуктуаційної НП), а потім і сусідніх сіток ДН через шар халькогеніду свинцю.

При аналізі впливу періоду ДН на температуру НП переходу, необхідно відзначити, що ми маємо чотири різних типи НГ, позначені у таблиці літерами А, В, С і D. НГ типу "А" складаються тільки з вузькозонних напівпровідників і мають більш високі T_c порівняно з НГ інших типів. В НГ типу "В" один з матеріалів шарів є широкозонним напівпровідником, що зменшує усереднену по НГ концентрацію носіїв. Тому й T_c таких НГ менша, ніж у НГ типу "А". В НГ типу "С" один з матеріалів шарів (EuS) є широкозонним напівпровідником і феромагнетиком. T_c таких НГ знижується в порівнянні з попередніми через ефект близькості та пригнічення НП феромагнетиком. Однак, навіть для таких НГ з феромагнітними шарами надпровідність не зникає зовсім. НГ типу "D" складаються

тільки з широкозонних напівпровідників (майже діелектриків) з дуже низькою концентрацією носіїв заряду, за якої важко чекати появи НП. Розглядати залежність температури НП переходу від періоду ДН необхідно окремо для кожного типу НГ (Рис. 8). При такому розгляді досить очевидно, що збільшення густини ДН (зменшення періоду сітки ДН) призводить до збільшення температури НП переходу для дислокаційних НГ (в межах кожного типу НГ).

Рис. 8. Залежності критичної температури НП переходу від періоду сіток ДН для НГ з вузькозонних напівпровідників (\square), з комбінації вузькозонних і широкозонних напівпровідників (\blacktriangle) та НГ з феромагнітними шарами EuS (\circ).

Надпровідність дислокаційних НГ є нетривіальною і не пояснюється жодною з існуючих теорій. Певна подібність елементів кристалічної структури та аналогія НП властивостей дислокаційних НГ і високотемпературних надпровідників (ВТНП) дозволяє зробити припущення про подібність природи та механізмів їх надпровідності. Сукупність проведених досліджень дозволяє зробити висновок про те, що дислокаційні НГ є зручними моделями ВТНП, в яких всі характерні розміри структури більш ніж на порядок збільшені, а критичні параметри НП, відповідно, зменшені, що суттєво полегшує їх дослідження.

Необхідно також відзначити, що багатошарові структури, що мають феромагнітні шари EuS, дозволяють спостерігати співіснування надпровідності та феромагнетизму в межах одного зразка.

У сьомому розділі “Магнітні властивості надграток” наведено аналіз стану та результатів дослідження магнітних властивостей багатошарових структур, що складаються з феромагнітних та немагнітних шарів. Вказується, що до цього часу досліджувались в основному багатошарові металеві структури, на яких спостерігалась взаємодія феромагнітних шарів через немагнітні прошарки. Впорядкування їх намагніченостей у паралельному або антипаралельному напрямках добре пояснювалось квантовою інтерференцією електронів провідності. Можливість такої взаємодії у напівпровідникових структурах не досліджувалась, так як здавалась маломожливою

через малу концентрацію носіїв заряду. НГ з халькогенідних напівпровідників дають унікальну можливість таких досліджень, так як серед них є феромагнітні матеріали (EuS, EuSe).

Перш за все було досліджено присутність та особливості переходу до феромагнітного стану шарів EuS у складі НГ, що визначалось за залежностями намагніченості та магнітної сприйнятливості від температури. Встановлено, що при зменшенні товщини EuS від 10 моношарів до 2 спостерігається (Рис.9) зменшення температури Кюрі від 17,2 до 10,3 К для зразків, отриманих на KCl, та з 13,5 до 8,7 К для зразків, отриманих на BaF₂, що пояснюється зменшенням

Рис. 9. Залежність температури Кюрі від товщини шарів EuS для НГ EuS-PbS/(111)BaF₂ (o) та EuS-PbS/(001)KCl (■). Суцільними лініями показані розрахункові залежності при різких міжфазних межах, пунктирними - при наявності перемішаних зон на межах ~ 2 моношарів.

числа найближчих магнітних сусідів (іонів Eu). Також знайдено зміну температури Кюрі на 2 - 3 К під впливом термічно індукованих напруг в системі плівка - підкладка через різницю їх коефіцієнтів температурного розширення. За кутовими та температурними залежностями ліній феромагнітного резонансу визначені константи магнітної анізотропії (K_{EuS}) для НГ на підкладках BaF₂ ($K_v = - 0,71$ МДж/м³ и $K_s = 0,08$ МДж/м²) та KCl ($K_v = - 0,67$ МДж/м³ и $K_s = 0,05$ МДж/м²). Встановлено, що залежність K_{EuS} від товщини шарів (d_{EuS}) відповідає відомій залежності $K(d_{EuS}) = K_v + 2K_s/d_{EuS}$ домінуючою роллю об'ємної складової K_v (анізотропія форми), що призводить до намагніченості у площині шарів EuS.

Найефективніший метод дослідження антиферомагнітного (AFM) впорядкування намагніченостей сусідніх шарів НГ - нейтронна дифракція. За допомогою неї були отримані дифракційні картини для НГ EuS-PbS та EuS-YbSe (рис. 10), де спостерігались AFM-піки. Це

дозволило однозначно стверджувати про наявність AFM впорядкування (намагніченості сусідніх шарів EuS направлені у протилежних напрямках). Таке впорядкування спостерігається для незвично великого діапазону товщини прошарків вузькозонного напівпровідника PbS (от 0,4 до 40 нм) та широкозонного YbSe (от 1 до 3 нм), що суттєво відрізняє напівпровідникові НГ від металевих.

Рис. 10. Нейтронограми ($\lambda = 0,475$ нм) НГ EuS(4,4 нм)-YbSe(2 нм)/(001) KCl (а) та EuS(6 нм)-PbS(2,3 нм)/(001)KCl (б) при $T = 35$ К, $B = 0$ Гс (o, x), $T = 4,3$ К, $B = 0$ Гс (●) и $T = 4,3$ К, $B = 185$ Гс (Δ).

Прикладення магнітного поля вдовж шарів НГ змінює впорядкування від антиферомагнітного до феромагнітного (FM). За зміною інтенсивності антиферомагнітного піка в зовнішньому магнітному полі було показано, що сила антиферомагнітної обмінної взаємодії зменшується зі збільшенням товщини немагнітного прошарку PbS (рис.11).

Дослідження AFM-взаємодії в НГ EuS-PbS за допомогою SQUID'а виявило її залежність від температури та товщини немагнітного прошарку (рис.11). Спостерігається зменшення енергії AFM-взаємодії зі збільшенням товщини прошарків і температури, що узгоджується як з її експериментальними вимірюваннями за допомогою дифракції нейтронів, так і з розрахунками за

Рис. 11. Залежність енергії міжшарової обмінної взаємодії (J) від товщини прошарків PbS (d_{PbS}) для НГ EuS-PbS на підкладках KCl (\diamond, \blacklozenge) та PbS (\circ, \bullet), отримані при вимірюваннях вздовж осі [100]

(\diamond, \circ) та осі [110] (\blacklozenge, \bullet). Товщини шарів EuS склали 3-6 нм. Для порівняння наведені дані, отримані з нейтронних досліджень (\blacktriangle), а також розрахункові значення для моделі Бліновськи-Кацман (Δ).

моделлю Бліновськи-Кацман, яка базується на розрахунках спин-залежної енергії валентних електронів. Зменшення енергії (при SQUID вимірюваннях) для дуже малих товщин прошарків ($< 0,7$ нм) пояснюється появою закороток, які створюють локальні феромагнітні зв'язки шарів, що призводить до зміни магнітного моменту всього зразка.

Більш важливим результатом є спостереження сильної температурної залежності енергії AFM-взаємодії. Встановлено, що константа міжшарової обмінної взаємодії має ступеневу залежність від намагніченості з показником степеня, який залежить від товщини магнітних шарів EuS.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена проблема зі встановлення закономірностей та нових ефектів в оптичних, електричних та магнітних властивостях напівпровідникових надграток з халькогенідних напівпровідників з невідповідністю ґрат суміжних шарів в широких межах (0,5 – 13%). Це дозволяє суттєво розширити коло можливих надграткових матеріалів, а невідповідність ґрат відкриває нові можливості зі створення одно- дво- та тривимірних надграткових наноструктур, що значно розширює як число структурних станів, так і, відповідно, діапазон варіації фізичних властивостей.

Результати проведених комплексних та систематичних досліджень зводяться до таких основних висновків:

1. На основі халькогенідних напівпровідників експериментально реалізовано три типи надграткових наноструктур:
 - Одновимірні (композиційні) надгратки (НГ), які синтезуються при малих невідповідностях та товщинах шарів, менших критичних для введення дислокацій невідповідності.
 - Двовимірні (дислокаційні) надгратки, при великих невідповідностях та товщинах шарів, більших критичних.
 - Тривимірні (дислокаційно-композиційні) надгратки, які є комбінацією перших двох.
2. Вперше для надграток з халькогенідних напівпровідників визначено ефективні коефіцієнти взаємодифузії матеріалів шарів у тонкоплівковому стані. Дифузійні характеристики досліджених систем не залежать від співвідношення товщин шарів надграток та величини періоду. Знайдено два етапи дифузії – швидка (на початкових етапах відпалів) та повільна. Швидка дифузія пов'язана з присутністю нерівноважних нестехіометричних точкових дефектів у досліджених

матеріалах. У системі EuS-PbSe знайдено ефект Кіркендала за зміною положення нульового рефлекса-сателіта у процесі дифузійних відпалів.

3. Знайшло подальший розвиток дослідження фотолюмінесценції надграток на основі напівпровідників A^4B^6 . Дослідження НГ EuS-PbS продемонстрували квантово-розмірні ефекти і показали, що за рахунок зміни товщини шарів PbS від 30 нм до 2 нм можна змінювати ефективну ширину забороненої зони (і відповідно довжину хвилі випромінювання) в широкому діапазоні енергії від 260 меВ до 600 меВ, що суттєво перевищує заборонену зону масивного PbS. Вперше знайдено лінії фотолюмінесценції, які відповідають випромінюванню з квантових точок, створених модуляцією структури впорядкованими дислокаційними сітками в площині композиції та модуляцією складу в ортогональному напрямку у тривимірних НГ PbSe-PbS/(001)KCl.
4. Дослідження поперечного транспорту в композиційних НГ EuS-PbS показали присутність у них резонансного тунелювання електронів через тонкі бар'єри EuS (2 - 5 нм), що робить вольт-амперні характеристики таких структур сильно нелінійними з появою на них ділянок від'ємної диференційної провідності (для двобар'єрних структур). Встановлено, що провідність таких структур змінюється при переході бар'єрних шарів до феромагнітного стану і знак її зміни визначається взаємною орієнтацією намагніченостей сусідніх шарів EuS. Така зміна провідності пов'язана з обмінним розщепленням зони провідності бар'єрних шарів та спіновою поляризацією електронів, що тунелюють через них.
5. Для двовимірних дислокаційних НГ при дослідженні їх подовжніх транспортних властивостей вперше знайдена надпровідність у багатошарових структурах з халькогенідів свинцю, олова, європію та ітербію, одношарові плівки яких не мають надпровідних переходів. Надпровідність НГ пов'язана з присутністю регулярних сіток дислокацій невідповідності на міжфазних межах (при відсутності сіток дислокацій надпровідність не спостерігається) і має наступні характеристики: температура переходу $T_c = 2 - 6,5$ К; максимальне критичне магнітне поле $H_{c2} = 30 - 40$ кЕ; енергетична щільність $2\Delta/kT_c \sim 10$. Встановлено, що надпровідність дислокаційних НГ має двовимірний характер та локалізована поблизу міжфазних меж. Спарювання носіїв відбувається початково на вузлах дислокаційної сітки (про що свідчить поява нульвимірної флуктуаційної НП). Надпровідність стабілізується взаємодією сусідніх дислокаційних вузлів (поява двовимірної флуктуаційної НП), а потім і сусідніх сіток ДН через шар халькогеніду свинцю. Збільшення густини ДН (зменшення періоду сітки ДН) призводить до збільшення температури НП переходу.
6. Дослідження феромагнітного переходу у НГ EuS-PbS показали, що шари EuS стають феромагнітними навіть при малих товщинах (~ 2 моношарів). При товщинах шарів $d_{EuS} > 4$ нм температура Кюрі (T_c) становить 13,6 К (на BaF_2) та 17,3 К (на KCl), що відрізняється від

масивного EuS (16,6 K). Показано, що такий зсув T_c пов'язаний, в основному, з дією термічно індукованих напруг через різницю температурних коефіцієнтів розширення підкладок та плівок. Для тонких шарів ($d_{\text{EuS}} < 3$ нм) спостерігається товщинна залежність T_c : вона поступово зменшується до 8 K при зменшенні товщини шарів до 0,4 нм. Така залежність температури Кюрі від товщини шарів EuS пов'язана зі зменшенням середнього числа магнітних сусідів для магнітних іонів, розташованих поблизу міжфазної межі.

7. За кутовими та температурними залежностями ліній феромагнітного резонансу визначені константи магнітної анізотропії (K_{EuS}) для НГ на підкладках BaF_2 ($K_v = -0,71$ МДж/м³ і $K_s = 0,08$ МДж/м²) та KCl ($K_v = -0,67$ МДж/м³ і $K_s = 0,05$ МДж/м²). Встановлено, що залежність K_{EuS} від товщини шарів (d_{EuS}) відповідає відомій залежності $K(d_{\text{EuS}}) = K_v + 2K_s/d_{\text{EuS}}$ з домінуючою роллю об'ємної складової K_v (анізотропія форми). Це призводить до намагніченості в площині шарів EuS. За допомогою дифракції поляризованих нейтронів встановлена магнітна анізотропія в площині шарів НГ та визначені особливості їхньої доменної структури. Показано, що намагніченості доменів у НГ EuS-YbSe та EuS-PbS лежать вздовж різних напрямків у площині шарів, а саме, вздовж легких осей типу $\langle 110 \rangle$ та $\langle 210 \rangle$, відповідно.
8. За допомогою дифракції нейтронів для напівпровідникових НГ знайдено антиферомагнітне (AFM) впорядкування магнітних шарів (намагніченості сусідніх шарів EuS направлені у протилежному напрямку), зумовлене взаємодією феромагнітних шарів EuS через діамагнітні прошарки PbS та YbSe . Таке впорядкування спостерігається для незвично великого діапазону товщин прошарків вузькозонного напівпровідника PbS (від 0,4 до 40 нм) та широкозонного YbSe (від 1 до 3 нм), що суттєво відрізняє напівпровідникові НГ від металевих. Для НГ EuS-PbS показана можливість керування впорядкуванням намагніченості сусідніх шарів EuS та їх перемиканням від антиферомагнітного до феромагнітного за допомогою відносно слабкого магнітного поля ($H = 100 - 200$ Гс), що робить дані структури перспективними для спінтроніки (спін-поляризованої електроніки) з можливістю контролю не тільки величини струму носіїв заряду, але й їх спінового стану.
9. Дослідження AFM-взаємодії в НГ EuS-PbS за допомогою SQUID'у виявили її залежність від температури та товщини немагнітного прошарку. Спостерігається зменшення енергії AFM-взаємодії зі збільшенням товщини прошарків і температури. Встановлено, що константа міжшарової обмінної взаємодії має ступеневу залежність від намагніченості шарів EuS з показником степеня, який залежить від товщини магнітних шарів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Колесников И.В., Литвинов В.А., Сипатов А.Ю., Федоренко А.И., Юнович А.Э. Квантово-размерные эффекты в люминесценции тонких пленок сульфида свинца и сверхрешеток сульфидов свинца и европия // ЖЭТФ. - 1988. - Т. 94, № 7. - С. 239-246.
2. Миронов О.А., Савицкий Б.А., Сипатов А.Ю., Федоренко А.И., Чиркин А.Н., Чистяков С.В., Шпаковская Л.П. Сверхпроводимость полупроводниковых сверхрешеток на основе халькогенидов свинца // Письма в ЖЭТФ. - 1988. - Т.48, № 2. - С. 100-102.
3. Борисова С.С., Михайлов И.Ф., Сипатов А.Ю., Шпаковская Л.П. Асимметрия сателлитов брэгговских отражений и характеристики распределения электронной плотности в одномерных сверхрешетках // Кристаллография. - 1988. - Т. 33, № 3. - С. 579-583.
4. Янсон И.К., Бобров Н.Л., Рыбальченко Л.Ф., Фисун В.В., Миронов О.А., Чистяков С.В., Сипатов А.Ю., Федоренко А.И. Микроконтактные измерения энергетической щели сверхпроводящих сверхрешеток на основе халькогенидов свинца // Письма в ЖЭТФ. - 1989. - Т. 49, № 5. - С. 293-296.
5. Колесников И.В., Сипатов А.Ю. Фотолюминесценция сверхрешеток PbS-EuS // Физика и техника полупроводников. - 1989. - Т. 23, № 6. - С. 954-959.
6. Колесников И.В., Ковалев А.Н., Сипатов А.Ю., Парамонов В.И., Федоренко А.И., Юнович А.Э. Квантово-размерные эффекты в фотолюминесценции сверхрешеток на основе халькогенидов свинца // Физика и техника полупроводников. - 1989. - Т. 23, № 6. - С. 960-963.
7. Миронов О.А., Чистяков С.В., Скрылев И.Ю., Зорченко В.В., Савицкий Б.А., Сипатов А.Ю., Федоренко А.И. Локализация параметра порядка на сетке дислокаций несоответствия сверхпроводящих полупроводниковых сверхрешеток PbTe-PbS/(001)KCl // Письма в ЖЭТФ. - 1989. - Т. 50, № 6. - С. 300-303.
8. Борисова С.С., Михайлов И.Ф., Палатник Л.С., Сипатов А.Ю., Федоренко А.И., Шпаковская Л.П. Формирование планарных слоев в одномерных сверхрешетках при послойном механизме роста // Кристаллография. - 1989. - Т. 34, № 3. - С. 716-722.
9. Fedorenko A.I., Savitskij B.A., Sipatov A.Yu., Zorchenko V.V, Chistyakov S.V., Mironov O.A., Skrylev I.Yu. The structure and galvanomagnetic properties of the planar epitaxial superlattices of lead chalcogenides // Acta Phys. Polonica. - 1990. - Vol. A77, № 2-3. - P. 251-255.
10. Бобров Н.Л., Рыбальченко Л.Ф., Фисун В.В., Янсон И.К., Миронов О.А., Чистяков С.В., Зорченко В.В., Сипатов А.Ю., Федоренко А.И. Микроконтактное исследование полупроводниковых сверхпроводящих сверхрешеток PbTe-PbS как модели ВТСП // Физика низких температур. - 1990. - Т. 16, № 12. - С. 1531-1558.
11. Mironov O.A., Chistyakov S.V., Skrylev I.Yu., Fedorenko A.I., Sipatov A.Yu., Shpakovskaya L.P., Nashchekina O.N., Oszwaldowski M. The galvanomagnetic properties of short-period SnTe/PbTe superlattices // Superlattices and Microstructures. - 1990. - Vol. 8, № 4. - P. 361- 363.

12. Зарицкий И.М., Кончиц А.А., Колесник С.П., Миронов О.А., Сипатов А.Ю., Федоренко А.И., Чистяков С.В. Динамика модулированного микроволнового поглощения и природа гистерезисных эффектов в ВТСП и ВТСП-подобных системах // *Сверхпроводимость: физика, химия, техника*. - 1991. - Т. 4, № 7. - С. 1400-1412.
13. Mironov O.A., Chistyakov S.V., Zaritskii I.M., Konchits A.A., Kolesnik S.P., Stephanovich V.A., Sipatov A.Yu., Fedorenko A.I. The nature of magnetic field hysteretic microwave absorption in the HTSC thin films and HTSC models epitaxial superlattices PbTe-PbS // *Physica C*. - 1991. - Vol. 180. - P. 196-198.
14. Mironov O.A., Chistyakov S.V., Fedorenko A.I., Shpakovskaya L.P., Sipatov A.Yu., Savitskij B.A., Nashchekina O.N., Oszwaldowski M. Superconductivity of non-strained PbTe-PbS and strained PbTe-SnTe superlattices // *Acta Physica Polonica*. - 1991. - Vol. A80, № 3. - P. 329-332.
15. Konchits A.A., Zaritskii I.M., Kolesnik S.P., Stephanovich V.A., Mironov O.A., Chistyakov S.V., Sipatov A.Yu., Fedorenko A.I. HTSC-like superlattices PbTe-PbS microwave spectroscopy // *Physica C*. - 1991. - Vol. 185-189. - P. 2737-2738.
16. Дмитренко И.М., Фогель Н.Я., Черкасова В.Г., Федоренко А.И., Сипатов А.Ю. Размерный кроссовер и природа сверхпроводящих слоев в полупроводниковых сверхрешетках PbTe/PbS // *Физика низких температур*. - 1993. - Т.19, № 7. - С. 747-754.
17. Herrmann K.H., Auth J., Mollmann K.P., Tomm J.W., Bottner H., Lambrecht A., Tacke M., Kolesnikov I.V., Yunovich A.E., Fedorenko A.I., Mironov O.A., Sipatov A.Yu. Band offsets in Eu-containing lead chalcogenides and lead chalcogenide superlattices from spectoscopic data // *Semicond. Sci. and Technol.* - 1993. - Vol. 8, № 18. - P. 176-179.
18. Mironov O.A., Zorchenko V.V., Sipatov A.Yu., Fedorenko A.I., Nashchekina O.N., Chistyakov S.V. Dislocation superlattices based on lead chalcogenides as HTSC models // *NCDS-1, Defect and Diffusion Forum*. - 1993. - Vol. 103-105. - P. 473-484.
19. Mironov O.A., Makarovski O.N., Fedorenko A.I., Sipatov A.Yu., Nashchekina O.N., Zaritskii I.M., Konchits A.A. Anisotropic microwave absorption in high- T_c like semiconductor superconducting superlattices (001)PbTe-PbS // *Acta Physica Polonica*. - 1994. - Vol. A85, № 3. - P. 603-606.
20. Lutskii V.N., Petrov V.A., Rylik A.S., Galkina E.V., Sipatov A.Yu., Fedorenko A.I., Fedorov A.G. Observation of negative differential resistance in a double barrier tunnel structure based on PbS (semiconductor) - EuS (magnetic semiconductor) system // *Phys. Low-Dim. Struct.* - 1994. - Vol. 7. - P. 37-42.
21. Фогель Н.Я., Черкасова В.Г., Сипатов А.Ю., Федоренко А.И., Рыбальченко В.Н. Уширение резистивных переходов и крип потока в сверхпроводящих сверхрешетках PbTe/PbS // *Физика низких температур*. - 1994. - Т. 20, № 11. - С. 1142-1147.

22. Fedorenko A.I., Fedorov A.G., Sipatov A.Yu., Mironov O.A. The epitaxial growth of IV-VI heterostructures and superlattices on (001)Si // *Thin Solid Films*. - 1995. - Vol. 267. - P. 134-137.
23. Tetyorkin V.V., Sipatov A.Yu., Sizov F.F., Fedorenko A.I., Fedorov A. (001)- oriented lead selenide films grown on silicon substrates // *Infrared Physics and Technology*. - 1996. - Vol. 37. - P. 379-384.
24. Fogel N.Ya., Cherkasova V.G., Pokhila A.S., Sipatov A.Yu., Fedorenko A.I. Superconductivity in the novel semiconducting superlattices // *Czechoslovak J. Phys.* - 1996. - Vol. 46. - P. 727-728.
25. Stachow-Wojcik A., Twardowski A., Story T., Dobrowolski W., Grodzicka E., Sipatov A. Magnetic properties of EuS/PbS semiconducting structures // *Acta Physica Polonica*. - 1997. - Vol. A92, № 5. - P. 985-988.
26. Fedorov A.G., Shneiderman I.A., Sipatov A.Yu., Kaidalova E.V. Study of diffusion in PbTe-PbSe superlattices using X-ray diffraction // *Functional Materials*. - 1998. - Vol. 5, № 1. - P. 52-56.
27. Сипатов А.Ю. Взаимодиффузия слоев в эпитаксиальных сверхрешетках PbSe-PbS // *Письма в ЖЭТФ*. - 1998. - Т. 68, № 9. - С. 716-718.
28. Fedorov A.G., Shneiderman I.A., Sipatov A.Yu., Kaidalova E.V. X-ray diffraction investigation of diffusion in PbTe-PbSe superlattices // *J. Crystal Growth*. - 1999. - Vol. 198/199. - P. 1211-1215.
29. Sipatov A.Yu. Misfit dislocation superlattices in IV-VI multilayered compounds as zero dimensional quantum boxes // *Физика низких температур*. - 1999. - Т.25, № 5. - С. 509-511.
30. Stachow-Wojcik A., Story T., Dobrowolski W., Arciszewska M., and Galazka R. R., Kreijveld M. W., Swuste C. H. W., Swagten H. J. M., de Jonge W. J. M., Twardowski A., Sipatov A. Yu. Ferromagnetic transition in EuS-PbS multilayers // *Phys Rev. B*. - 1999. - Vol. 60, № 22. - P. 15220-15229.
31. Fedorov A.G., Sipatov A.Yu., Kaidalova E.V. Layer intermixing in epitaxial PbSe-PbS superlattices // *Functional Materials*. - 1999. - Vol. 6, № 5. - P. 860-862.
32. Федоренко А.И., Зорченко В.В., Сипатов А.Ю., Миронов О.А., Чистяков С.В., Нащекина О.Н. Осцилляции и квантование сопротивления в особых температурных точках трехслойных пленок PbS-PbTe-PbS на (001)KCl // *Физика твердого тела*. - 1999. - Т. 41, № 9. - С. 1693-1697.
33. Story T., Swuste C.H.W., Swagten H.J.M., de Jonge W.J.M., Stachow-Wojcik A., Twardowski A., Arciszewska M., Dobrowolski W., Galazka R.R. and Sipatov A.Yu. Magnetic anisotropy in EuS-PbS multilayers // *Acta Physica Polonica*. - 2000. - Vol. A97, № 3. - P. 435-438.
34. Stolpe I., Puhlmann N., Portugall O., von Ortenberg M., Dobrowolski W., Sipatov A.Yu., Dugaev V.K. Megagauss magnetospectroscopy of EuS/PbS multi-quantum wells // *Phys. Rev. B*. - 2000. - Vol. 62, № 24. - P. 16798-16801.
35. Fogel N.Y., Erenburg A.I., Pokhila A., Bomze Y., Sipatov A.Y., Langer V. Semiconducting chalcogenide multilayers: structure and superconductivity // *Physica B*. - 2000. - Vol. 284-288. - P. 1123-1124.

36. Федоренко А.И., Зорченко В.В., Сипатов А.Ю., Миронов О.А., Чистяков С.В. Магнитопольные осцилляции критического тока и силы пиннинга в полупроводниковых сверхрешетках PbTe/PbS и пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ // ЖЭТФ. - 2000. - Т. 117, № 6. - С. 1161-1171.
37. Fogel N.Ya., Pokhila A.S., Bomze Yu.V., Sipatov A.Yu., Fedorenko A.I., Shekhter R.I. Novel superconducting semiconducting superlattices: dislocation-induced superconductivity // Phys. Rev. Letters. - 2001. - Vol. 86, № 3. - P. 512-515.
38. Erenburg A.I., Bomze Yu.V., Fogel N.Ya., Sipatov A.Yu., Fedorenko A.I., Langer V., Norell M. Structural investigations of superconducting multilayers consisting of semiconducting materials // Физика низких температур. - 2001. - Т. 27, № 2. - С. 127-130.
39. Кепа Н., Kutner-Pielaszek J., Twardowski A., Sipatov A.Yu., Majkrzak C.F., Story T., Galazka R.R., Giebultowicz T.M. Interlayer correlations in ferromagnetic semiconductor superlattices EuS/PbS // J. Magnetism and Magnetic Materials. - 2001. - Vol. 226-230. - P. 1795-1797.
40. Кепа Н., Kutner-Pielaszek J., Blinowski J., Twardowski A., Majkrzak C.F., Story T., Kacman P., Galazka R.R., Ha K., de Jonge H.J.M., Sipatov A.Yu., Volobuev V. and Giebultowicz T.M. Antiferromagnetic interlayer coupling in ferromagnetic semiconductor EuS/PbS(001) superlattices // Europhysics Letters. - 2001. - Vol. 56, № 1. - P. 54 - 60.
41. Fogel N. Ya., Buchstab E. I., Bomze Yu. V., Yuzepovich O. I., Sipatov A. Yu., Pashitskii E. A., Danilov A., Langer V., Shekhter R. I., and Jonson M. Interfacial superconductivity in semiconducting monochalcogenide superlattices // Physical Review B. - 2002. - Vol. 66. - 174513 (11 pages).
42. A. Fedorov, A. Sipatov, V. Volobuev. Diffusion and Kirkendall effect in PbSe-EuS multilayer // Thin Solid Films. - 2003. - Vol. 425. - P. 287-291.
43. Кепа Н., Majkrzak C. F., Sipatov A. Yu. and Giebultowicz T. M. Polarized neutron reflectivity studies of magnetic semiconductor superlattices // Physica B. - 2003. - Vol. 335, № 1-4. - P. 44-49.
44. Wrotek S., Dybko K., Morawski A., Małosa A., Wosiński T., Figielski T., Tkaczyk Z., Łusakowska E., Story T., Sipatov A. Yu. Szczerbakow., A., Graszka K., Wróbel J., Palosz W. Vertical electron transport through PbS-EuS structures // Acta Phys. Pol. - 2003. - Vol. A 103. - P. 629-635.
45. Figielski M., Morawski A., Wosinski T., Wrotek S., Makosa A., Lusakowska E., Story T., Sipatov A. Yu., Szczerbakow A., Graszka K., Wrobel J., and Palosz W. Search for spin filtering by electron tunneling through ferromagnetic EuS barrier in PbS // J. of Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism. - 2003. - Vol. 16, No 1. - P. 183-185.
46. Кепа Н., Majkrzak C.F., Sipatov A.Yu., Giebultowicz T.M. Domain structure of EuS/PbS and EuS/YbSe superlattices studied by polarized neutron reflectometry // Physica B. - 2004. - Vol. 345. - P. 193-196.
47. Smits C.J.P., Filip A.T., Swagten H.J.M., Koopmans B., de Jonge W. J. M., Chernyshova M., Kowalczyk L., Graszka K., Szczerbakow A., Story T., Palosz W., and Sipatov A.Yu. Antiferromagnetic

- interlayer exchange coupling in all-semiconducting EuS/PbS/EuS trilayers // *Phys. Rev. B.* - 2004. - Vol. 69, № 22. - 224410 (7 pages).
48. Smits C.J.P., Filip A.T., Swagten H.J.M., de Jonge W.J.M., Chernyshova M., Kowalczyk L., Graszka K., Szczerbakow A., Story T., Sipatov A.Yu. Modeling interlayer exchange coupling in EuS/PbS/EuS trilayers // *Journal of Applied Physics.* - 2004. - Vol. 95, № 11. - P. 7169-7171.
49. Кепа Н., Sankowski P., Kacman P., Sipatov A.Yu., Majkrzak C.F., Giebultowicz T.M. Antiferromagnetic interlayer coupling in EuS/YbSe superlattices // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* - 2004. - Vol. 272 - 276. - P. 323-324.
50. Chernyshova M., Kowalczyk L., Baran M., Szczerbakow A., Story T., Smits C.J.P., Filip A.T., Swagten H.J.M., de Jonge W.J.M., Sipatov A.Yu. Temperature dependence of interlayer exchange coupling in EuS-PbS multilayers // *Acta Phys. Pol.* - 2004. - Vol. A 105. - P. 599-605.
51. Sankowski P., Кепа Н., Kacman P., Sipatov A.Yu., Majkrzak C.F., Giebultowicz T.M. Interlayer coupling in EuS-based superlattices deduced from neutron scattering experiments // *Acta Phys. Pol.* - 2004. - Vol. A 105. - P. 607-614.
52. Wrotek S., Morawski A., Tkaczyk Z., Makosa A., Wosinski T., Dybko K., Lusakowska E., Story T., Sipatov A.Yu., Pecz B., Graszka K., Szczerbakow A., Wrobel J. Fabrication and electrical characterization of PbS-EuS ferromagnetic semiconductor microstructures // *Acta Phys. Pol.* - 2004. - Vol. A 105. - P. 615-620.

АННОТАЦИЯ

Сипатов А.Ю. Эпитаксиальные сверхрешетки и квантовые структуры из монохалькогенидов свинца, олова, европия и иттербия. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков. – Институт монокристаллов НАН Украины, Харьков, 2006.

Диссертация посвящена выявлению закономерностей и новых квантоворазмерных эффектов в оптических, электрических и магнитных свойствах эпитаксиальных сверхрешеток (СР) из халькогенидных полупроводников с несоответствием решеток сопрягаемых слоев в широких пределах ($f = 0,5 - 13\%$). Приведен анализ современного состояния и проблем синтеза и исследования многослойных пленочных композиций и сверхрешеток.

Использование таких структур ($f > 0$) позволяет существенно расширить круг сверхрешеточных материалов, а несоответствие открывает новые возможности по созданию одно-двух- и трехмерных сверхрешеточных наноструктур, что значительно расширяет как число структурных состояний, так и, соответственно, диапазоны вариации их физических свойств.

На основе халькогенидных полупроводников экспериментально реализованы три типа сверхрешеточных наноструктур:

- Одномерные (композиционные) сверхрешетки, которые синтезируются при малых несоответствиях и толщинах слоев, меньше критических для введения дислокаций несоответствия.
- Двумерные (дислокационные) сверхрешетки, при больших несоответствиях и толщинах слоев, больше критических.
- Трехмерные (дислокационно-композиционные) сверхрешетки, которые являются комбинацией первых двух.

Для двумерных дислокационных сверхрешеток обнаружена сверхпроводимость в многослойных структурах из халькогенидов свинца, олова, европия и иттербия, которая связана с наличием регулярных сеток дислокаций несоответствия (ДН) на межфазных границах (отсутствие сеток дислокаций приводит к отсутствию сверхпроводимости). Увеличение плотности ДН (уменьшение периода ДН) приводит к увеличению температуры сверхпроводящего перехода.

Обнаружены спектры фотолюминесценции из квантовых точек, созданных модуляцией структуры упорядоченными дислокационными сетками в плоскости композиции и модуляцией состава в ортогональном направлении в трехмерных сверхрешетках PbSe-PbS/(001)KCl.

В композиционных СР EuS-PbS обнаружено резонансное туннелирование электронов через тонкие барьеры EuS (2-5 нм), что делает вольт-амперные характеристики таких структур сильно нелинейными с появлением на них участков с отрицательной дифференциальной проводимостью. Установлено, что проводимость таких структур изменяется при переходе барьерных слоев в ферромагнитное состояние и знак ее изменения определяется взаимной ориентацией намагниченностей соседних слоев EuS.

Для полупроводниковых СР обнаружено антиферромагнитное упорядочение магнитных слоев (намагниченности соседних слоев EuS направлены в противоположном направлении), обусловленное взаимодействием ферромагнитных слоев EuS через диамагнитные прослойки PbS и YbSe. Такое упорядочение наблюдается для необычно большого диапазона толщины прослоек узкозонного полупроводника PbS (от 0,4 до 40 нм) и широкозонного YbSe (от 1 до 3 нм), что существенно отличает полупроводниковые СР от металлических.

Определена магнитная анизотропия в плоскости слоев СР и определены особенности их доменной структуры. Показано, что намагниченности доменов в СР EuS-YbSe и EuS-PbS лежат вдоль различных направлений в плоскости слоев, а именно, вдоль легких осей типа $\langle 110 \rangle$ и $\langle 210 \rangle$, соответственно.

Установлена зависимость энергии антиферромагнитного взаимодействия в СР EuS-PbS от температуры и толщины немагнитной прослойки (наблюдается ее уменьшение с увеличением толщины прослоек и температуры). Константа межслоевого обменного взаимодействия имеет

степенную зависимость от намагниченности с показателем степени, который зависит от толщины магнитных слоев EuS.

Для сверхрешеток из халькогенидных полупроводников определены эффективные коэффициенты взаимодиффузии материалов слоев в тонкопленочном состоянии. Обнаружено два этапа диффузии – быстрая (на начальных этапах отжига) и медленная. В системе EuS-PbSe обнаружен эффект Киркендалла.

Управление упорядочением намагниченностей соседних слоев EuS в СР и их переключение от антиферромагнитного к ферромагнитному при помощи магнитного поля делает данные структуры весьма перспективными для спинтроники (спин-поляризованной электроники) с возможностью контроля не только величины тока носителей заряда, но и их спинового состояния.

Ключевые слова: эпитаксиальная полупроводниковая сверхрешетка, структура, взаимодиффузия, фотолюминесценция, резонансное туннелирование, сверхпроводимость, намагниченность, межслоевое обменное взаимодействие, антиферромагнитное упорядочение.

АНОТАЦІЯ

Сіпатов О.Ю. Епітаксіальні надгратки та квантові структури з монохалькогенідів свинцю, олова, Європію та ітербію. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників та діелектриків. – Інститут монокристалів НАН України, Харків, 2006.

Використання багатошарових плівок халькогенидних напівпровідників з невідповідністю ґрат суміжних шарів в широких межах (0,5 – 13%) дозволило не тільки розширити коло надграткових матеріалів, але й відкрило нові можливості зі створення одно- дво- та тривимірних надграткових наноструктур, що призвело до відкриття нових ефектів. Для двовимірних (дислокаційних) надграток вперше виявлена надпровідність, яка пов'язана з присутністю періодичних сіток дислокацій невідповідності на міжфазних межах (відсутність дислокацій призводить до відсутності надпровідності). Для тривимірних надграток PbSe-PbS вперше знайдено спектри люмінесценції з квантових точок, створених модуляцією структури періодичними дислокаціями в площині композиції та модуляцією складу в ортогональному напрямку. Для одновимірних (композиційних) надграток знайдено резонансне тунелювання електронів через

ферромагнітні бар'єри EuS, а також антиферромагнітне впорядкування магнітних шарів, зумовлене їх взаємодією через діамагнітні прошарки PbS та YbSe. Таке впорядкування спостерігається для незвично великого діапазону товщини прошарків вузькозонного напівпровідника PbS (від 0,4 до 40 нм) та широкозонного YbSe (від 1 до 3 нм).

Ключові слова: епітаксіальна напівпровідникова надгратка, структура, взаємодифузія, фотолюмінесценція, резонансне тунелювання, надпровідність, намагніченість, міжшарова обмінна взаємодія, антиферромагнітне впорядкування.

ABSTRACT

Sipatov A.Yu. Epitaxial superlattices and quantum structures from lead, tin, europium and ytterbium chalcogenides. – Manuscript. Thesis for scientific degree of Doctor of sciences in physics and mathematics by specialty 01.04.10 - physics of semiconductors and dielectrics. - Institute for Single Crystals, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, 2006.

The multilayer chalcogenide semiconductor films with large layer lattice misfit (0,5 - 13%) give us the possibility not only to extend the number of superlattice materials, but open the new opportunity to create one- two- and three- dimensional superlattice nanostructures with new properties and effects. The superconductivity was discovered for the first time in two-dimensional (dislocational) superlattices. The presence of periodic networks of misfit dislocations at interfaces is directly responsible for the superconductivity (the absence of dislocations leads to the absence of superconductivity). The luminescence spectra from quantum dots were discovered for the first time in three-dimensional PbSe-PbS superlattices. The dots were made by structure modulations from periodic misfit dislocations in the plane of multilayers and composition modulations in the orthogonal direction. The resonance tunneling of electrons via ferromagnetic EuS barriers was found for one-dimensional (compositional) superlattices. The antiferromagnetic interlayer coupling of magnetic EuS layers via non-magnetic PbS and YbSe spacers was found for the first time in semiconductor superlattices. Such coupling was observed for unusual wide range of spacer thicknesses for narrow-gap PbS semiconductor (from 0,4 nm to 40 nm) and wide-gap YbSe (from 1 nm to 3 nm).

Keywords: epitaxial semiconductor superlattice, structure, interdiffusion, photoluminescence, resonance tunneling, superconductivity, magnetization, interlayer coupling, antiferromagnetic ordering.