

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Сипатов Александр Юрьевич

УДК 621.315.5; 621.36;
535.37; 539.2; 539.23

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СВЕРХРЕШЕТКИ И КВАНТОВЫЕ СТРУКТУРЫ ИЗ
МОНОХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА, ОЛОВА, ЕВРОПИЯ И ИТТЕРБИЯ

01.04.10 – Физика полупроводников и диэлектриков

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Харьков – 2006 г.

Диссертация - рукопись.

Работа выполнена в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" Министерства просвещения и науки Украины, г. Харьков.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
член-корреспондент НАН Украины
Пузиков Вячеслав Михайлович,
Институт монокристаллов НАН Украины
директор института.

доктор физико-математических наук, профессор
Стасюк Зиновий Васильевич,
Львовский национальный университет
имени Ивана Франка,
зав. каф. физической и биомедицинской
электроники.

доктор физико-математических наук, профессор
Финкель Виталий Александрович,
Национальный научный центр НАН Украины
„Харьковский физико-технический институт”,
начальник лаборатории физического
материаловедения функциональных керамик.

Ведущая организация: Институт физики полупроводников НАН
Украины, отдел физико-технологических проблем
полупроводниковой инфракрасной техники, г.
Киев.

Защита состоится " 18 " октября 2006 г. в 14 часов на заседании
специализированного ученого совета Д 64.169.01 при Институте
монокристаллов НАН Украины

Адрес: 61001, г. Харьков, пр. Ленина, 60

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института монокристаллов
НАН Украины

Автореферат разослан " ____ " _____ 2006 г.

Ученый секретарь специализированного совета,

кандидат физико-математических наук

Добротворская М.В

ABSTRACT

Sipatov A.Yu. Epitaxial superlattices and quantum structures from lead, tin, europium and itterbium 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.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Синтез новых материалов, исследование их структуры и свойств является одним из наиболее актуальных вопросов физики полупроводников и диэлектриков. Одним из наиболее перспективных объектов исследования являются сверхрешетки (СР), представляющие собой многослойные структуры с периодическим чередованием сверхтонких слоев различных материалов, создающих дополнительный модулирующий потенциал для носителей заряда. Обладая уникальными свойствами, СР представляют повышенный интерес как для фундаментальных исследований, так и для их практического применения. Основными требованиями для создания эпитаксиальных СР являются: 1) послойный рост используемых материалов друг на друге, 2) различие их запрещенных зон, 3) малое несоответствие периодов их решеток. Поэтому одним из актуальных вопросов для создателей сверхрешеток является поиск материалов, удовлетворяющих этим условиям. За последние десятилетия основные усилия исследователей и, естественно, наиболее заметные успехи достигнуты для СР на основе соединений A^3B^5 и A^2B^6 , для которых проблему малого несоответствия решеток решают при помощи создания многокомпонентных барьерных слоев. Исследованиям многослойных структур с большим несоответствием решеток сопрягаемых слоев уделяли недостаточно внимания, так как полагали, что несоответствие может приводить к напряжениям, деформациям и дефектам, что создает дополнительные и нежелательные центры рассеяния для носителей заряда. Таким образом, проблема создания и исследования физических свойств СР на основе многослойных пленок с большим несоответствием решеток слоев к моменту постановки задачи данной работы оставалась нерешенной, что сильно ограничивало как набор материалов для изготовления СР, так и диапазон свойств, получаемых на них.

Решение этой проблемы позволит существенно расширить круг сверхрешеточных материалов, а несоответствие кристаллических решеток сопрягаемых слоев открывает новые возможности по созданию СР с однородно- и неоднородно-упругодеформированными слоями, с упорядоченными системами дислокаций и решетками совпадающих узлов на межфазных границах. Это значительно расширяет как число структурных состояний, так и, соответственно, диапазоны вариации физических свойств СР.

Связь работы с научными программами, планами и темами. Работа выполнялась на кафедре физики металлов и полупроводников в соответствии с плановыми заданиями научно-исследовательского отдела Национального технического университета «ХПИ» и в рамках международных проектов:

1. “Исследования структурных превращений, физических свойств и процессов деградации металлических, полупроводниковых и диэлектрических пленок, перспективных для технических применений” (номер госрегистрации 0186.011 7328, 1987 – 1991 г.г.);

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 госрегистрации 0193У027850, 1991 – 1993 г.г.);

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 госрегистрации 0194У012927: 1994 – 1996 р.р.; 0196У14669: 1997 – 1999 р.р.);

4. “Интердифузия в надтонких шарах богатосарових композицій і надрешіток” (номер госрегистрации 0197У001910, 1997-1999 г.г.);

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

6. “Дослідження наноструктурованих плівок та композицій на їх основі” (номер госрегистрации 0103У001534, 2003 - 2005 г.г.)

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 г.г.).

Цель и задачи исследования.

Цель данной работы – установление закономерностей и эффектов, связанных с переходом в низкоразмерное состояние эпитаксиальных сверхрешеток из халькогенидных полупроводников с несоответствием решеток сопрягаемых слоев в широких пределах. Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

1. Установление особенностей и закономерностей эпитаксиального роста и структуры халькогенидных полупроводников на различных подложках и друг на друге в зависимости от несоответствия решеток сопрягаемых слоев.
2. Исследование термической и временной стабильности многослойных структур из халькогенидных полупроводников.
3. Установление особенностей и закономерностей электрических, оптических и магнитных свойств сверхрешеток, а также их взаимосвязи со структурой.

Объект исследования – эффекты и физические явления, связанные с переходом полупроводниковой системы к низкоразмерности.

Предмет исследования - сверхрешетки из халькогенидов свинца, олова, европия и иттербия с несоответствием решеток слоев в широких пределах (от 0,5 % до 13 %), и их электрические, оптические и магнитные свойства.

Методы исследования. Образцы изготавливались в оригинальной высоковакуумной установке с безмасляной системой откачки (до 10^{-7} Па) резистивным испарением халькогенидов свинца и олова из вольфрамовых лодочек и электронно-лучевым испарением халькогенидов редкоземельных

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 феромагнітні бар'єри EuS, а також антиферомагнітне впорядкування магнітних шарів, зумовлене їх взаємодією 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).

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

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

металлов. Многослойные пленки синтезировались путем последовательной конденсации халькогенидов на свежеосколотые подложки щелочно-галлоидных кристаллов при температуре 473-523 К. Толщина слоев и скорость конденсации контролировались при помощи откалиброванного кварцевого резонатора с точностью до 0.1 нм. Для структурных исследований применялись современные методы высокоразрешающей электронной микроскопии, рентгеновской и нейтронной дифракции, а при исследовании физических свойств применялся комплекс современных низкотемпературных методов измерения оптических, электрических и магнитных характеристик.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующих впервые установленных положениях:

1. 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 (в отсутствие сеток ДН сверхпроводимость не наблюдается). Увеличение плотности ДН (уменьшение периода ДН) приводит к увеличению температуры сверхпроводящего перехода.
2. Созданы трехмерные сверхрешетки с модуляцией структуры упорядоченными дислокационными сетками в плоскости композиции и модуляцией состава в ортогональном направлении, для которых обнаружены линии фотолюминесценции, соответствующие излучению из квантовых точек.
3. В одномерных композиционных СР EuS-PbS обнаружено резонансное туннелирование электронов через тонкие барьеры EuS, 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.
4. 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 толщин 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.
5. Определена магнитная анизотропия в плоскости слоев СР и установлены 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.

6. 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 слоев с показателем степени, зависящим от толщины EuS.

Практическое значение полученных результатов определяется решением поставленной задачи по созданию эпитаксиальных СР на основе многослойных пленочных композиций с несоответствием решеток сопрягаемых слоев в широких пределах, что существенно расширяет круг сверхрешеточных материалов и открывает широкие возможности как для фундаментальных исследований в области физики полупроводников и диэлектриков, так и для создания новых функциональных элементов микроэлектроники, СВЧ- и ИК-техники. Открыты новые сверхпроводящие структуры – дислокационные сверхрешетки, которые могут быть использованы в качестве удобных объектов для моделирования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с плавным и хорошо контролируемым изменением их структурных параметров. Разработана оригинальная методика выращивания монокристалльных пленок халькогенидов свинца на кремниевых подложках с применением буферных слоев из халькогенидов редкоземельных металлов. Определены коэффициенты взаимодействия слоев СР, что позволяет оценить время жизни функциональных элементов на их основе. На основе СР из халькогенидных полупроводников можно создавать ИК-лазеры с широким диапазоном длины волны излучения, величина которой будет определяться толщиной квантовой ямы. 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.

Личный вклад соискателя. В опубликованных работах [1-52] автор Сипатов А.Ю. принимал непосредственное участие в формировании направления исследований, постановке задачи, обработке экспериментальных результатов, а также в формулировании выводов. Непосредственно автором были изготовлены все образцы и исследована их структура (электронная микроскопия и рентгеновская дифракция). Совместно с коллегами из других организаций автор принимал участие в измерениях электрических [2,4,7,9-16,18-21,23-24,32,35-38,41,44-45,52], оптических [1,5-6,17,29] и магнитных характеристик [25,30,33-34,40,47-48,50] образцов, в том числе при помощи дифракции нейтронов [39-40,43,46,49,51], а также в исследованиях взаимодействия [26,28,31,42]. Конкретный вклад соавторов в опубликованных работах приведен в примечании к диссертации.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы были представлены и доложены на: 13-й всесоюзной конференции по

49. Kępa H., Sankowski P., Kacman P., Sipaťov 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., Sipaťov 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., Kępa H., Kacman P., Sipaťov 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., Sipaťov 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.

- consisting of semiconducting materials // **Физика низких температур**. - 2001. - Т. 27, № 2. - С. 127-130.
39. Kępa H., 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. Kępa H., 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. Kępa H., 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. Kępa H., 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.

электронной микроскопии, Сумы, 1987 г.; 9-й всесоюзной конференции по физике полупроводников, Кишинев, 1988 г.; 8-й международной конференции по тройным и многокомпонентным соединениям, Кишинев, 1990 г. (8 Int. Conf. On Ternary and Multinary Compounds, Kishinev, 1990); 7-й международной конференции по узкозонным полупроводникам, Саутгемптон, Англия, 1992 г. (7 Int. Conf. of Narrow-Gap Semiconductors, Southampton, 1992); 8-й международной конференции по узкозонным полупроводникам, Санта-Фе, США, 1995 г. (8 Int. Conf. of Narrow-Gap Semiconductors, Santa-Fe, USA, 1995); 21-й международной конференции по физике низких температур, Прага, Чехия, 1996 г. (21-st Int. Conf. on Low Temperature Physics, Prague, 1996); IV международной конференции «Материаловедение и свойства материалов для инфракрасной электроники», Киев, 1998 г. (IV Int. Conf. “Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics”, Kyiv, 1998); международном семинаре «Диффузия и диффузионные фазовые превращения в сплавах», Черкассы, 1998 г. (Int. Workshop “Diffusion and diffusional phase transformations in alloys”, Cherkasy, 1998); 18-ой международной конференции по термоэлектричеству, Балтимор, США, 1999 г. (18-th Int. Conf. on Thermoelectrics, Baltimore, USA, 1999); 2-ой международной конференции по физике и применению спиновых явлений в полупроводниках, Вюрцбург, Германия, 2002 г. (2-nd Int. Conf. on Physics and Application of Spin Related Phenomena in Semiconductors, Wurzburg, Germany, 2002); 16-й международной конференции по магнетизму, Рим, Италия, 2003 г. (16 Int. Conf. on Magnetism, Rome, Italy, 2003); на международном симпозиуме «Нанозфизика и нанозлектроника», Нижний Новгород, Россия, 2005 г..

Публикации. По теме диссертации опубликовано 64 работы. Из них 52 статьи в специализированных научных журналах, 12 тезисов докладов на конференциях.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 разделов, выводов, списка использованных источников (422 источника). Она содержит 313 страниц, включает 11 таблиц и 126 рисунков, а также 1 примечание.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности выбранной темы исследования и необходимости его проведения, сформулирована проблема и определены цель и задачи работы, указаны объект и предмет исследования и методы их синтеза и аттестации. Здесь же указана связь работы с научными планами и программами, отмечена научная новизна и практическое значение полученных результатов.

В первом разделе приведен обзор публикаций по полупроводниковым сверхрешеткам, в котором отмечено, что сверхрешетки представляют собой новый класс искусственных полупроводниковых структур с управляемым

зонным спектром носителей заряда. Целенаправленно изменяя состав и структуру СР, можно прогнозировано изменять их энергетическую зонную структуру и получать уникальные физические свойства, недостижимые для обычных кристаллов и пленок. В обзоре указано, что за последние десятилетия основные усилия исследователей и, естественно, наиболее заметные успехи достигнуты для СР на основе A^3B^5 и A^2B^6 с малым несоответствием решеток сопрягаемых слоев. Исследованиям многослойных структур с большим несоответствием решеток сопрягаемых слоев уделяли недостаточно внимания, так как полагали, что несоответствие может приводить к напряжениям, деформациям и дефектам, что создает дополнительные и нежелательные центры рассеяния для носителей заряда. Таким образом, проблема создания и исследования физических свойств СР на основе многослойных пленок с большим несоответствием решеток слоев к моменту постановки задачи данной работы оставалась нерешенной, что сильно ограничивало как набор материалов для изготовления СР, так и диапазон свойств, получаемых на них. Поэтому основным направлением данной работы было выбрано исследование особенностей формирования структуры и физических свойств эпитаксиальных СР и квантовых структур на основе многослойных пленочных композиций с несоответствием решеток слоев в широких пределах.

Во втором разделе описаны методики создания и исследования пленок и сверхрешеток из халькогенидных полупроводников. Образцы изготавливались в оригинальной высоковакуумной установке с безмасляной системой откачки (до 10^{-7} Па) резистивным испарением халькогенидов свинца и олова из вольфрамовых лодочек и электронно-лучевым испарением халькогенидов редкоземельных металлов. Многослойные пленки синтезировались путем последовательной конденсации халькогенидов на свежеосколотые подложки щелочно-галлоидных кристаллов при температуре 473-523 К. Толщина слоев и скорость конденсации контролировались при помощи откалиброванного кварцевого резонатора с точностью до 0.1 нм. Для структурных исследований применялись современные методы высокоразрешающей электронной микроскопии, рентгеновской и нейтронной дифракции, а при исследовании физических свойств применялся комплекс современных низкотемпературных методов измерения оптических, электрических и магнитных характеристик.

Стабильность сверхрешеток и процессы взаимодействия в них исследовались при помощи рентгеновской дифракции по изменению интенсивности рефлексов-сателлитов в процессе диффузионных отжигов образцов.

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 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ // **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

- 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 spectroscopic 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., Makarovskii 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.

Третий раздел "Эпитаксиальный рост и структура пленок и сверхрешеток халькогенидных полупроводников" посвящен исследованию особенностей эпитаксиального роста и структуры многослойных пленок с несоответствием решеток сопрягаемых слоев в широких пределах. В качестве материалов для исследований были выбраны халькогениды свинца, олова и редкоземельных металлов (РЗМ), которые: во-первых, на момент постановки задачи являлись наименее исследованными сверхрешеточными материалами; во-вторых, дают большой набор халькогенидных соединений с изоморфными кристаллическими решетками, но различными периодами, концентрациями и энергетическими спектрами носителей заряда. Это дает возможность создания многослойных композиций с несоответствием решеток слоев в широких пределах (от 0,5 % до 13 %) и комбинацией слоев из узкозонных, широкозонных, ферромагнитных, диамагнитных материалов (Табл.1) и создает хорошие перспективы для поиска новых явлений и эффектов в таких структурах.

Таблица 1. Период решетки (a), ширина запрещенной зоны (E_g), температура плавления (T_m), температура Кюри (T_K) и температура Нееля (T_N) халькогенидных соединений.

Материалы	a , нм	E_g , эВ	T_m , °C	T_K , (T_N), К
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 получения уникальных свойств СР необходимо реализовать послойный рост используемых материалов друг на друге в виде монокристалльных слоев достаточно хорошего качества. Необходимо также подобрать подложки для получения на них монокристалльных пленок выбранных материалов с необходимым совершенством кристаллической структуры. Поэтому, прежде всего, были проведены исследования особенностей эпитаксиального роста данных материалов на различных подложках.

Известно, что для халькогенидов свинца и олова наиболее оптимальными являются подложки KCl и BaF₂, на которых они растут в виде монокристалльных пленок в ориентации (001) и (111) соответственно. Электронно-микроскопические и рентгеновские исследования эпитаксии халькогенидов РЗМ показали, что они на этих подложках растут в виде поликристаллических, в лучшем случае текстурированных пленок.

Монокристалльные слои халькогенидов иттербия получают только на подложках кремния при температурах 1173 - 1223 К. При более низких температурах (~ 523 К) монокристаллические пленки халькогенидов РЗМ можно вырастить на монокристалльных пленках халькогенидов свинца и олова благодаря реализации послойного механизма их роста друг на друге.

В многослойных структурах из халькогенидов свинца, олова, иттербия и европия при несоответствии параметров решеток слоев $f > 2\%$ на (001) межфазной границе формируются ортогональные ряды краевых дислокаций несоответствия (ДН) (Рис. 1). Подбирая пары материалов с разной величиной

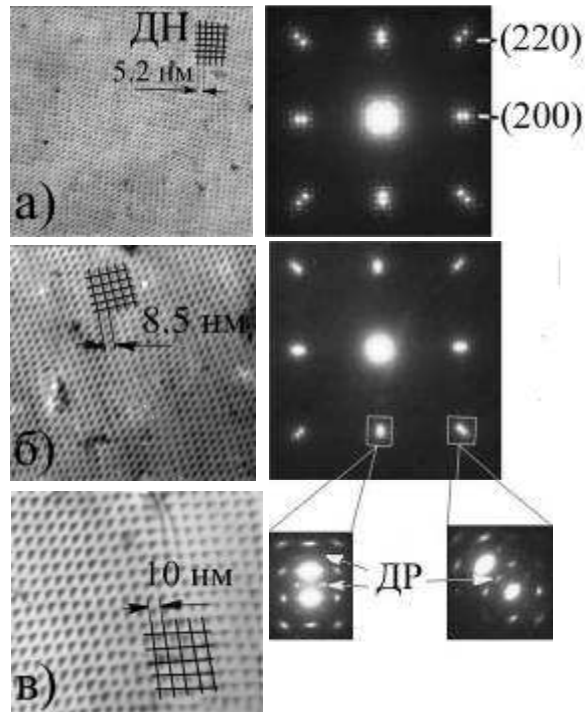


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения (слева) и электронограммы (справа) пленок YbS-PbSe (а), YbS-PbS (б) и YbSe-PbSe (в). ДР - дислокационные рефлексы. ДН - дислокации несоответствия.

несоответствия их параметров решеток ($f = 13 - 2\%$), можно изменять период ДН в широких пределах ($D_{\text{ДН}} = 3.3 - 23$ нм) (Табл. 2).

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 V.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 V.A., Naschekina O.N., Oszwaldowski M. Superconductivity of

- осей типа $\langle 110 \rangle$ и $\langle 210 \rangle$, соответственно.
- При помощи дифракции нейтронов 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. Для СР EuS-PbS показана возможность управления упорядочением намагниченностей соседних слоев EuS и их переключение от антиферромагнитного к ферромагнитному при помощи относительно слабых магнитных полей ($H = 100 - 200$ Гс), что делает данные структуры весьма перспективными для спинтроники (спин-поляризованной электроники) с возможностью контроля не только величины тока носителей заряда, но и их спинового состояния.
 - Исследования AFM-взаимодействия в СР EuS-PbS при помощи SQUID'a выявили его зависимости от температуры и толщины немагнитной прослойки. Наблюдается уменьшение энергии AFM-взаимодействия с увеличением толщины прослоек и температуры. Установлено, что константа межслоевого обменного взаимодействия имеет степенную зависимость от намагниченности слоев EuS с показателем степени, который зависит от толщины магнитных слоев.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 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.
- 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.
- 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.
- 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

Таблица 2. Расчетные значения несоответствия (f), периода ДН (D) и экспериментальные значения критической толщины введения ДН (h_c) и минимальной толщины слоев для формирования сверхрешеток (h_m).

СР	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

Для ориентации (111) имеется возможность управления дислокационными структурами путем изменения степени вакуума. В этой ориентации сетки ДН получаются только при выращивании многослойных структур в сверхвысоком вакууме ($P_{\text{ост}} < 10^{-7}$ Па). Ухудшение вакуума ($P_{\text{ост}} > 10^{-6}$ Па) приводит к смене механизма роста от послойного к островковому, в результате чего вырастают монокристалльные пленки халькогенидов без ДН на (111) межфазной границе. ДН компенсируют несоответствие решеток сопрягаемых слоев и локализуют напряжения и деформации, вызванные этим несоответствием, вблизи межфазной границы в виде периодических модуляций. Величина дислокационных напряжений вполне достаточна для модуляции запрещенной зоны полупроводника и, учитывая высокую регулярность и периодичность ДН (на которых наблюдается дифракция электронов – появление дислокационных рефлексов на электронограммах), их можно рассматривать как новый тип двумерных сверхрешеток с периодической модуляцией структуры в межфазной плоскости.

Одним из наиболее эффективных методов контроля периодических структур является рентгеновская дифракция, при которой на дифрактограммах многослойных структур вместо брегговских рефлексов от каждого материала появляется интерференционная картина, состоящая из рефлексов-сателлитов (Рис.2.а), расстояние между которыми определяется периодом СР.

Аналогичная система пиков-сателлитов наблюдается и у первичного пучка, положение которых также определяется периодом сверхрешетки, но с учетом преломления, которое становится существенным при малых углах. При съемках многослойных структур «на просвет» можно определить толщину слоев, при которой наблюдается срыв псевдоморфизма (или введение ДН) по расщеплению псевдоморфного рефлекса на два отдельных, соответствующих каждому из слоев. Таким образом можно определить критическую толщину слоев для формирования ДН, что и было сделано для каждой пары наших материалов, а результаты приведены в Табл. 2. В этой же таблице приведены значения минимальной толщины слоев, при которой возможно создание сверхрешеток, определяемой по наличию рефлексов-сателлитов хотя бы первого порядка.

Результаты структурных исследований систематизированы и представлены в виде следующего обобщения. На основе халькогенидных полупроводников реализованы три типа сверхрешеточных наноструктур:

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

Четвертый раздел «Взаимодиффузия в сверхрешетках». Сверхрешетки открывают широкие возможности как для фундаментальных исследований, так и для создания новых функциональных элементов микроэлектроники, ИК-техники, оптоэлектроники. Для таких структур со сверхтонкими слоями очень важное значение имеет состояние межфазных границ - их шероховатость, резкость перехода от одного слоя к другому, наличие и величина перемешанных зон, а также временная и температурная стабильность их структуры и свойств. Диффузионные процессы в таких сверхтонких слоях с большим градиентом концентраций элементов могут иметь свои особенности и отличия от массивного состояния. Поэтому исследования взаимодиффузии материалов слоев в сверхрешетках (СР) имеет очень важное значение как в теоретическом, так и в практическом аспектах. Большой градиент концентраций на столь малых расстояниях может привести к быстрому перемешиванию слоев и деградации сверхрешеток уже на стадии их изготовления. Поэтому возникает необходимость аттестации СР по величине и степени перемешанных зон, образующихся в процессе их изготовления при

проводимости барьерных слоев и спиновой поляризацией электронов, туннелирующих через них.

5. Для двумерных дислокационных СР при исследовании их продольных транспортных свойств впервые была обнаружена сверхпроводимость в многослойных структурах из халькогенидов свинца, олова, европия и иттербия, однослойные пленки которых не имеют сверхпроводящих переходов. Сверхпроводимость СР связана с наличием регулярных сеток дислокаций несоответствия на межфазных границах (в отсутствие сеток дислокаций сверхпроводимость не наблюдается) и имеет следующие характеристики: температура перехода $T_c = 2 - 6.5$ К; максимальное критическое магнитное поле $H_{c2} = 30 - 40$ кЭ; энергетическая щель (Δ) - $2\Delta/kT_c \sim 10$. Установлено, что сверхпроводимость дислокационных СР имеет двумерный характер и локализована вблизи межфазных границ. Спаривание носителей происходит первоначально в окрестности узлов дислокационной сетки (о чем свидетельствует появление нульмерной флуктуационной СП). Сверхпроводимость стабилизируется взаимодействием соседних дислокационных узлов (появление двумерной флуктуационной СП), а затем и соседних сеток ДН через слой халькогенида свинца. Увеличение плотности ДН (уменьшение периода ДН) приводит к увеличению температуры СП перехода.
6. Исследования ферромагнитного перехода в СР EuS-PbS показали, что слои EuS становятся ферромагнитными даже при очень малых толщинах (~ 2 монослоев). При толщинах слоев $d_{EuS} > 4$ нм температура Кюри (T_c) составляет 13.6 К (на BaF_2) и 17.3 К (на KCl), что отличается от массивного EuS (16.6 К). Показано, что такой сдвиг T_c связан, в основном, с действием термически индуцированных напряжений из-за различия температурных коэффициентов расширения подложек и пленок. Для тонких слоев ($d_{EuS} < 3$ нм) наблюдается толщинная зависимость T_c : ее постепенное уменьшение до 8 К при уменьшении толщины слоев до 0.4 нм. Такая зависимость температуры Кюри от толщины слоев EuS связана с уменьшением среднего числа магнитных соседей для магнитных ионов, размещенных вблизи межфазной границы.
7. По угловым и температурным зависимостям линий ферромагнитного резонанса определены константы магнитной анизотропии (K_{EuS}) для СР на подложках BaF_2 ($K_v = -0.71$ МДж/м³ и $K_s = 0.08$ МДж/м²) и KCl ($K_v = -0.67$ МДж/м³ и $K_s = 0.05$ МДж/м²). Установлено, что зависимость K_{EuS} от толщины слоев (d_{EuS}) соответствует известной зависимости $K(d_{EuS}) = K_v + 2K_s/d_{EuS}$ с доминирующей ролью объемной составляющей K_v (анизотропия формы), что приводит к намагниченности в плоскости слоев EuS. При помощи дифракции поляризованных нейтронов установлена 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

структурных состояний, так и, соответственно, диапазоны вариации их физических свойств.

Результаты проведенных комплексных и систематических исследований сводятся к следующим основным выводам:

1. 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.
2. Впервые для сверхрешеток из халькогенидных полупроводников определены эффективные коэффициенты взаимодиффузии материалов слоев в тонкопленочном состоянии. Диффузионные характеристики исследованных систем не зависят от соотношения толщин слоев сверхрешеток и величины периода. Обнаружено два этапа диффузии – быстрая (на начальных этапах отжига) и медленная. Быстрая диффузия связана с наличием неравновесных нестехиометрических точечных дефектов в исследованных материалах. В системе EuS-PbSe обнаружен эффект Киркендалла по изменению положения нулевого рефлекса-сателлита в процессе диффузионных отжигов.
3. Получило дальнейшее развитие исследование фотолюминесценции сверхрешеток на основе полупроводников A^4B^6 . Исследования CP EuS-PbS продемонстрировали квантово-размерные эффекты и показали, что за счет изменения толщины слоев PbS от 30 нм до 2 нм можно изменять эффективную ширину запрещенной зоны (и соответственно длину волны излучения) в очень широком диапазоне энергий от 260 мэВ до 600 мэВ, что существенно превосходит запрещенную зону массивного PbS. Впервые обнаружены линии фотолюминесценции, соответствующие излучению из квантовых точек, созданных модуляцией структуры упорядоченными дислокационными сетками в плоскости композиции и модуляцией состава в ортогональном направлении в трехмерных CP PbSe-PbS/(001)KCl.
4. Исследования поперечного транспорта в композиционных CP EuS-PbS показали наличие в них резонансного туннелирования 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 (для двухбарьерных структур). Установлено, что проводимость таких структур изменяется при переходе барьерных слоев в ферромагнитное состояние и знак ее изменения определяется взаимной ориентацией намагниченностей соседних слоев EuS. Такие изменения проводимости связаны с обменным расщеплением зоны

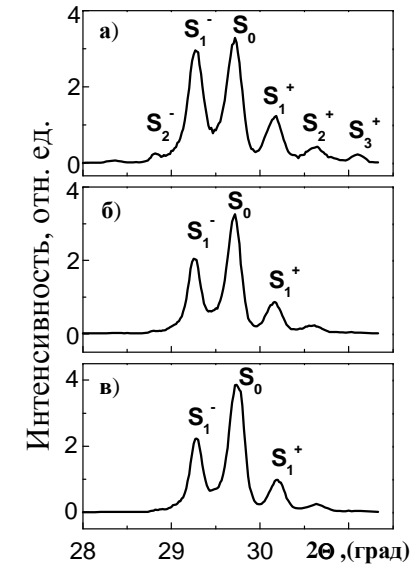


Рис. 2. Кривые рентгеновской дифракции в отражении (200) для CP PbSe-PbS с периодом 20 нм в исходном состоянии (а) и после отжига при температуре 543 К в течение 10 часов (б) и 78 часов (в). S_n - рефлексы-сателлиты.

температуре роста (~ 523 К). В разделе приведен анализ современных методов исследования интердиффузии слоев в периодических многослойных структурах, который показывает, что для эпитаксиальных CP одним из наиболее эффективных методов является рентгеновская дифракция на брегговских отражениях. Этот метод позволяет по изменению интенсивности рефлексов-сателлитов не только проследить процессы перемешивания слоев, но и определить коэффициенты их взаимодиффузии [26-28]:

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

где: D - коэффициент диффузии; H - период сверхрешетки; n - порядок рефлекса-сателлита; I_n - относительная интенсивность рефлекса-сателлита n -го порядка, нормированная на интенсивность рефлекса нулевого порядка; τ - время отжига. Учитывая закон Аррениуса ($D = D_0 \exp(E_A/kT)$), можно определить значения энергии активации E_A и предэкспоненциального множителя D_0 , рассчитать коэффициент взаимодиффузии для любой требуемой температуры и оценить величину перемешанной зоны (X_0) на межфазной границе за время τ : $X_0 \sim 2(D\tau)^{1/2}$. Для решения данной задачи были проведены серии диффузионных отжигов сверхрешеток в вакууме при различных температурах. Периодически, после каждого отжига, проводили рентгеновские съемки образцов. Результаты проведенных исследований показывают, что в процессе отжига интенсивность

боковых рефлексов-сателлитов уменьшается, а центрального (нулевого) растет, что свидетельствует о взаимном перемешивании слоев, например для СР PbSe-PbS (Рис.2).

На логарифмических зависимостях интенсивности от времени отжига, представленных на рис.3, видно, что имеется два этапа диффузии - быстрая (на начальных этапах отжигов) и медленная.

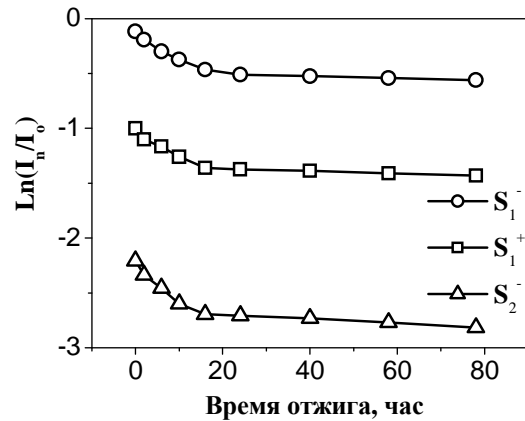


Рис. 3. Изменение относительной интенсивности рефлексов-сателлитов первого (S_1) и второго (S_2) порядков отражения со временем отжига при температуре 543 К для СР PbSe-PbS с периодом 20 нм.

Используя соотношение (1) для СР PbSe-PbS были определены коэффициенты взаимодиффузии слоев, значения которых составляют:

для быстрой диффузии $D = 3.6 \times 10^{-19} \text{ см}^2/\text{с}$ (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 медленной $D = 1.6 \times 10^{-20} \text{ см}^2/\text{с}$ (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);

Из закона Аррениуса ($D = D_0 \exp(E/kT)$) были определены значения энергии активации E_A и предэкспоненциального множителя D_0 для этапов быстрой и медленной диффузии:

для быстрой: $D_0 = 2.4 \times 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$; $E_A = 0.95 \text{ эВ}$;

для медленной: $D_0 = 5.3 \times 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$; $E_A = 1.78 \text{ эВ}$.

Быстрая диффузия на начальных этапах отжигов, по-видимому, связана с наличием неравновесных нестехиометрических точечных дефектов в халькогенидах свинца, о чем свидетельствует и низкое значение энергии активации ($E = 0.95 \text{ эВ}$).

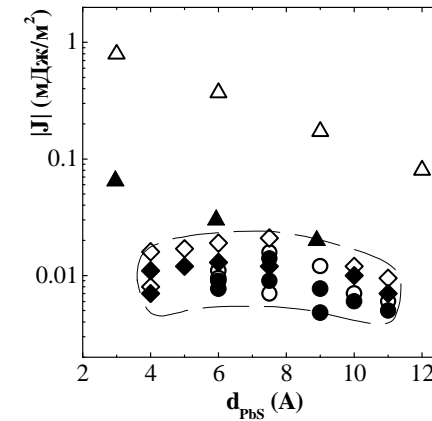


Рис. 11. Зависимость энергии межслоевого обменного взаимодействия (J) от толщины прослоек PbS (d_{PbS}) для СР EuS-PbS на подложках KCl (\diamond, \blacklozenge) и PbS (\circ, \bullet), полученные при измерениях вдоль $[100]$ оси (\diamond, \circ) и $[110]$ оси (\blacklozenge, \bullet). Толщины слоев EuS составляли 3-6 нм. Для сравнения приведены данные, полученные из нейтронных исследований (\blacktriangle), а также расчетные значения по модели Блиновски-Кацман (Δ) [40,49,51].

спинзависимой энергии валентных электронов. Уменьшение энергии (при SQUID измерениях) для очень малых толщин прослоек ($< 0.7 \text{ нм}$) объясняется появлением закороток, создающих локальные ферромагнитные связи слоев, что приводит к изменению магнитного момента всего образца.

Более важным результатом является наблюдение сильной температурной зависимости энергии AFM-взаимодействия. Константа межслоевого обменного взаимодействия имеет степенную зависимость от намагниченности с показателем степени, который зависит от толщины магнитных слоев EuS.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена проблема по выявлению закономерностей и новых квантоворазмерных эффектов в оптических, электрических и магнитных свойствах полупроводниковых сверхрешеток из халькогенидных полупроводников с несоответствием решеток сопрягаемых слоев в широких пределах (0.5 – 13%). Это позволяет существенно расширить круг возможных сверхрешеточных материалов, а несоответствие решеток открывает новые возможности по созданию одно- двух- и трехмерных сверхрешеточных наноструктур, что значительно расширяет как число

(ионов Eu). Так же обнаружено изменение температуры Кюри на 2 - 3 К под действием термически индуцированных напряжений в системе пленка - подложка из-за различия их коэффициентов температурного расширения. По угловым и температурным зависимостям линий ферромагнитного резонанса определены константы магнитной анизотропии (K_{EuS}) для CP на подложках BaF_2 ($K_v = -0.71$ Мдж/м³ и $K_s = 0.08$ мдж/м²) и KCl ($K_v = -0.67$ Мдж/м³ и $K_s = 0.05$ мдж/м²). Установлено, что зависимость K_{EuS} от толщины слоев (d_{EuS}) соответствует известной зависимости $K(d_{EuS}) = K_v + 2K_s/d_{EuS}$ с доминирующей ролью объемной составляющей K_v (анизотропия формы), что приводит к намагниченности в плоскости слоев EuS.

Наиболее эффективный метод исследования антиферромагнитного (AFM) упорядочения намагниченностей соседних слоев CP - нейтронная дифракция, при помощи которой были получены дифракционные картины для CP EuS-PbS и EuS-YbSe (рис. 10), на которых наблюдались AFM-пики. Это позволило однозначно говорить о наличии AFM упорядочения (намагниченности соседних слоев EuS направлены в противоположном направлении). 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 CP от металлических.

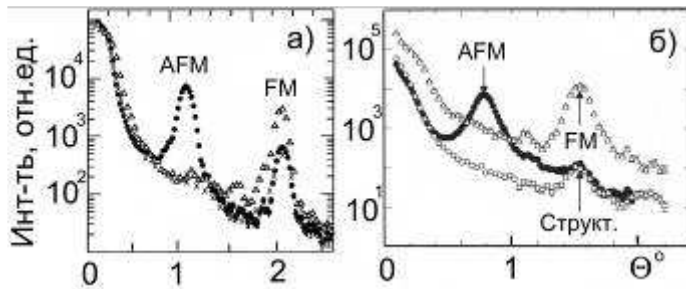


Рис. 10. Нейтронограммы CP EuS(4.4 нм)-YbSe(2 нм)/(001)KCl (а) и EuS(6 нм)-PbS(2.3 нм)/(001)KCl (б) при $T = 35$ К, $B = 0$ Гс (о,х), $T = 4.3$ К, $B = 0$ Гс (•) и $T = 4.3$ К, $B = 185$ Гс (Δ).

При приложении магнитного поля вдоль слоёв CP наблюдается изменение упорядочения от антиферромагнитного к ферромагнитному. По изменению интенсивности антиферромагнитного пика во внешнем магнитном поле было показано, что сила антиферромагнитного обменного взаимодействия уменьшается с увеличением толщины немагнитной прослойки PbS (рис.11).

Исследования AFM-взаимодействия в CP EuS-PbS при помощи SQUID'a выявили его зависимости от температуры и толщины немагнитной прослойки (рис.11). Наблюдается уменьшение энергии AFM-взаимодействия с увеличением толщины прослоек и температуры, что согласуется как с его экспериментальными измерениями при помощи дифракции нейтронов, так и с расчетами по модели Блиновски-Кацман [40,49,51], основанной на расчетах

Величина перемешанной зоны слоев CP при температуре ее синтеза (523 К) составляет $X_0 \sim 0,4$ нм ($\tau = 1$ час), что соответствует 1 монослою.

Аналогичные измерения были проведены для других систем и полученные результаты представлены в Таблице 3.

Таблица 3. Диффузионные характеристики CP. f - несоответствие решеток слоев; H - период CP; h_i - толщина слоя; T - температура отжига; D - коэффициенты диффузии; D_0 - предэкспоненциальный множитель; E_a - энергия активации; $D_{523\text{ К}}$ - коэффициент диффузии при 523 К; ΔX - величина перемешанной зоны при 523 К за 1 час.

CP	f, %	H (h_1+h_2), нм	T, К	D, см ² /с	D ₀ , см ² /с	E _a , эВ	D _{523 К} , см ² /с	ΔX, 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	3.0×10^{-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						

Следует отметить, что для CP с халькогенидами РЗМ перемешивание слоев происходит медленнее, коэффициенты взаимодиффузии слоев при тех же температурах имеют меньшее значение. Существенно меньше и величина перемешанной зоны, которая даже за 10 часов не превышает 1 монослоя. Диффузионные характеристики исследованных систем не зависят от соотношения толщин слоев CP и величины периода. В системе EuS-PbSe

обнаружен эффект Киркендалла по изменению положения нулевого рефлекса-сателлита в процессе диффузионных отжигов. Особо следует отметить системы PbTe-PbS ($f = 8.3\%$) и EuS-PbTe ($f = 7.7\%$), для которых перемешивания слоев не наблюдается вплоть до температур 733 К, после чего материалы начинают реиспаряться (без перемешивания).

Таким образом, синтезированные сверхрешетки в исходном состоянии представляют собой периодические многослойные структуры, состоящие из монокристаллических слоев халькогенидных полупроводников с резкими границами раздела и являются стабильным структурно-аттестованным объектом исследования для поиска новых явлений и эффектов.

В пятом разделе «Фотолюминесценция сверхрешеток» приведен анализ возможностей оптических методов для исследования низкоразмерных структур, из которого следует, что одним из наиболее эффективных методов исследования размерного квантования энергетического спектра носителей заряда в полупроводниках является фотолюминесценция. Квантово-размерные эффекты можно наблюдать по изменению положения пиков люминесценции при изменении толщины излучающего слоя и при изменении уровня возбуждения (или накачки), что и было продемонстрировано на спектрах наших образцов, полученных при возбуждении люминесценции импульсным Nd-лазером ($\lambda = 1.06$ мкм). Так на зависимостях длинноволнового края пиков излучения от толщины однослойных пленок PbS/(001)KCl наблюдается его

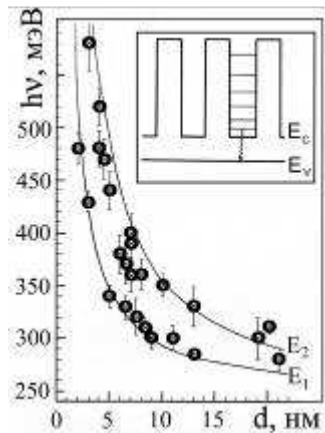


Рис. 4. Зависимость длинноволнового края пиков фотолюминесценции для СР EuS-PbS от толщины слоя PbS. E_i – расчетные кривые положения уровней размерного квантования. На вставке схематично показана зонная модель СР.

увеличение от 260 мэВ до 580 мэВ при уменьшении толщины от 30 нм до 3 нм. Экспериментальные точки хорошо согласуются с расчетом положения первого уровня размерного квантования для одиночной квантовой ямы. Аналогичная

Необходимо также отметить, что многослойные структуры, содержащие ферромагнитные слои EuS позволяют наблюдать сосуществование сверхпроводимости и ферромагнетизма в пределах одного и того же образца.

В седьмом разделе «Магнитные свойства сверхрешеток» приведен анализ состояния и результатов исследования магнитных свойств многослойных структур, состоящих из ферромагнитных и немагнитных слоев. Указывается, что до настоящего времени исследовались в основном многослойные металлические структуры, на которых наблюдалось взаимодействие ферромагнитных слоев через немагнитные прослойки. Упорядочение их намагниченностей в параллельном или антипараллельном направлениях хорошо объяснялось квантовой интерференцией электронов проводимости. Возможность такого взаимодействия в полупроводниковых структурах до настоящего времени не исследовалась, так как представлялась маловероятной из-за малой концентрации носителей заряда. СР из халькогенидных полупроводников предоставляют уникальную возможность таких исследований, так как среди них имеются ферромагнитные материалы (EuS, EuSe).

Прежде всего были исследованы наличие и особенности перехода в ферромагнитное состояние слоев EuS в составе СР, которое определялось по зависимостям намагниченности и магнитной восприимчивости от температуры. Установлено, что при уменьшении толщины EuS от 10 монослоев до 2 наблюдается (Рис.9) уменьшение температуры Кюри от 17,2 до 10,3 К для

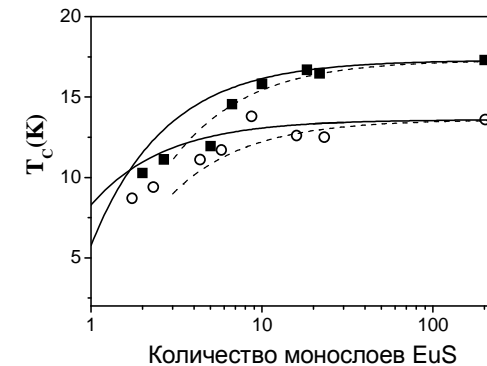


Рис. 9. Зависимость температуры Кюри от толщины слоев EuS для СР EuS-PbS/(111)BaF₂ (○) и EuS-PbS/(001)KCl (■). Сплошными линиями показаны расчетные зависимости при резких межфазных границах, пунктирными - при перемешанных зонах на границах ~ 2 монослоев.

образцов, выращенных на KCl, и с 13,5 до 8,7 К для образцов, выращенных на BaF₂, что объясняется уменьшением числа ближайших магнитных соседей

полупроводников и имеют более высокие T_c по сравнению с СР других типов. В СР типа "В" один из материалов слоев является широкозонным полупроводником, что уменьшает усредненную по СР концентрацию носителей. Поэтому и T_c таких СР меньше, чем в СР типа "А". В СР типа "С" один из материалов слоев (EuS) является широкозонным полупроводником и ферромагнетиком. T_c таких СР понижается по сравнению с предыдущими из-за эффекта близости и подавления СП ферромагнетиком. Однако, даже для таких СР с ферромагнитными слоями сверхпроводимость не исчезает совсем. СР типа "D" состоят только из широкозонных полупроводников (почти диэлектриков) с очень низкой концентрацией носителей заряда, при которой трудно ожидать появления СП. Рассматривать зависимость температуры СП перехода от периода ДН необходимо отдельно для каждого типа СР (Рис. 8). При таком рассмотрении, вполне очевидно, что увеличение плотности ДН (уменьшение периода ДН) приводит к увеличению температуры СП перехода для дислокационных СР (в пределах каждого типа СР).

Наблюдаемая в дислокационных СР сверхпроводимость является

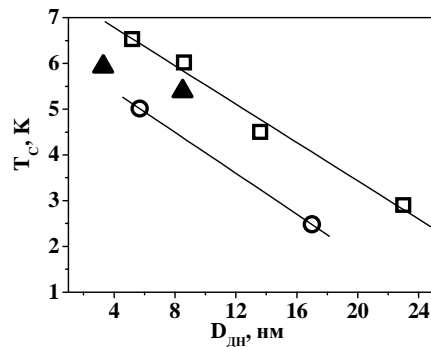


Рис. 8. Зависимости критической температуры СП перехода от периода сеток ДН для СР из узкозонных полупроводников (□), с комбинацией узкозонных и широкозонных полупроводников (▲) и СР с ферромагнитными слоями EuS (○).

нетривиальной и не объясняется ни одной из существующих теорий. Определенное сходство элементов кристаллической структуры и аналогия СП свойств дислокационных СР и ВТСП позволяет сделать предположение о подобии природы и механизмов их сверхпроводимости. Совокупность проведенных исследований позволяет сделать вывод о том, что дислокационные СР являются удобной моделью ВТСП, в которых все характерные размеры структуры более чем на порядок увеличены, а критические параметры соответственно уменьшены, что существенно облегчает их изучение.

зависимость наблюдается и для СР EuS-PbS (Рис. 4), где положение экспериментальных точек хорошо согласуется с расчетными зависимостями для первого и второго уровней размерного квантования, выполненными для модели Кронига-Пенни (см. вставку на рис. 4).

Наиболее интересным является случай трехмерной СР PbSe-PbS/(001)KCl, которую можно представить как набор периодических квантовых «ящиков» (или точек), ограниченных в одном направлении модуляцией состава, а в двух других направлениях – периодической модуляцией структуры дислокационными напряжениями. На спектре люминесценции такой структуры (Рис. 5) присутствуют три эквидистантных пика (четвертый пик находится на удвоенном расстоянии по энергии), для которых с изменением температуры (от 5 К до 90 К) не происходит изменения их ширины и положения, а наблюдается перекачка интенсивности между ними. Такое поведение качественно

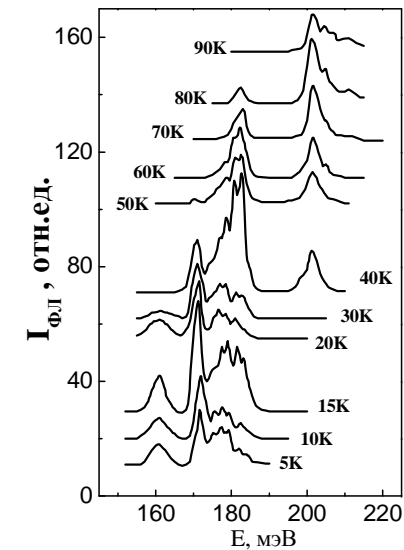


Рис. 5. Спектры ФЛ трехмерной СР PbSe-PbS с толщинами слоев по 7 нм.

согласуется с моделью квантовых точек.

Таким образом, при помощи фотолюминесценции продемонстрированы возможности размерного квантования энергетического спектра носителей заряда как для одномерных, так и для трехмерных СР. Наблюдение линий вынужденного излучения в спектрах СР при определенном уровне возбуждения свидетельствует о перспективности применения данных СР в качестве активных элементов ИК-лазеров с оптической накачкой.

Шестой раздел "Электрофизические свойства сверхрешеток". Исследования электрического транспорта в СР на основе многослойных структур с широким диапазоном несоответствия параметров решеток их слоев показали существенные различия свойств одномерных (композиционных) и двумерных (дислокационных) СР. В разделе приведен анализ возможностей электрических измерений в СР, из которого следует, что одним из наиболее ярких эффектов при поперечном транспорте является резонансное туннелирование. Исследования поперечного транспорта в многослойных структурах EuS-PbS показали наличие в них резонансного туннелирования электронов через тонкие барьеры EuS (2 - 5 нм), что делает вольт-амперные характеристики таких структур сильно нелинейными (Рис.6) с появлением на

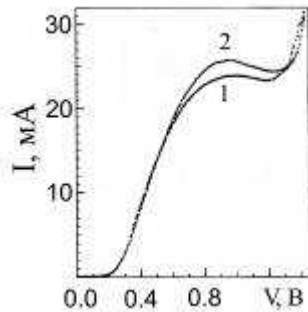


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика поперечного транспорта двухбарьерной туннельной структуры EuS(3 нм)-PbS(7 нм)-EuS(3 нм)/(001)PbTe (с сечением мезаструктуры 100×100 мкм) при 77 К, полученная при увеличении (1) и уменьшении (2) напряжения.

них участков с отрицательной дифференциальной проводимостью (для двухбарьерных структур). Установлено, что проводимость таких структур изменяется при переходе барьерных слоев в ферромагнитное состояние и знак ее изменения определяется взаимной ориентацией намагниченностей соседних слоев EuS. Такие изменения проводимости связаны с обменным расщеплением зоны проводимости барьерных слоев и спиновой поляризацией электронов, туннелирующих через них. Все это делает данные структуры весьма перспективными для спинтроники (спин-поляризованной электроники) с возможностью контроля не только величины тока носителей заряда, но и их спинового состояния.

Для двумерных дислокационных СР при исследовании их продольных транспортных свойств впервые была обнаружена сверхпроводимость в многослойных структурах из халькогенидов свинца, олова, европия и иттербия, однослойные пленки которых не имеют сверхпроводящих переходов (Табл.4).

Таблица 4. Несоответствие параметров решеток (f), период дислокаций несоответствия ($D_{ДН}$) и максимальная критическая температура СП перехода (T_c) для СР.

	СР	f, %	$D_{ДН}$, нм	T_c , К
A	PbTe-SnTe	2.0	23.0	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	17.0	2.48
	EuS-PbTe	7.7	5.7	5.01
	EuS-PbS	0.5	нет ДН	нет СП
D	YbS-YbSe	3.8	10.6	нет СП
	YbS-EuS	5.3	7.7	нет СП

Сверхпроводимость СР связана с наличием регулярных сеток дислокаций несоответствия на межфазных границах (отсутствие сеток дислокаций приводит к отсутствию сверхпроводимости) и имеет следующие характеристики: температура перехода $T_c = 2 - 6.5$ К; максимальное критическое магнитное поле $H_{c2} = 30 - 40$ кЭ; энергетическая щель (Δ): $2\Delta/kT_c \sim 10$ (рис. 7).

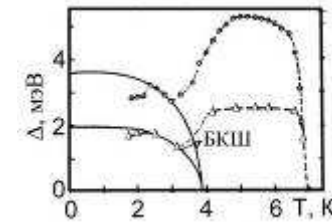


Рис. 7. Температурные зависимости энергетических щелей, полученные из микроконтактных измерений, для трехслойных пленок PbS-PbTe-PbS (о) и СР PbTe-PbS (Δ) с толщинами слоев по 18 нм.

Установлено, что сверхпроводимость (СП) дислокационных СР имеет двумерный характер и локализована вблизи межфазных границ. Спаривание носителей происходит первоначально в окрестности узлов дислокационной сетки (о чем свидетельствует появление нульмерной флуктуационной СП). Сверхпроводимость стабилизируется взаимодействием соседних дислокационных узлов (появление двумерной флуктуационной СП), а затем и соседних сеток ДН через слой халькогенида свинца.

При анализе влияния периода ДН на температуру СП перехода, необходимо отметить, что мы имеем четыре разных типа СР, отмеченных в таблице буквами А, В, С и D. СР типа "А" состоят только из узкозонных