

ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені Юрія ФЕДЬКОВИЧА

На правах рукопису

КЛІЧУК Ольга Ромович

ОБМІННІ ЕФЕКТИ В ШИРОКОЗОННИХ НАПІВМАГНІТНИХ
НАПІВПРОВІДНИКАХ НА ОСНОВІ СПОЛУК $A^{2+}B^{VI}$

01.04.10. - Фізика напівпровідників та діелектриків

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Чернівці - 1995

Дисертація в рукописі.

221.315.59
37.226

Ав 33.082

Робота виконана на кафедрі фізичної електроніки Чернівецького державного університету ім. П.П.Шевченка.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00761208 (0)

Науковий керівник - доктор фізико-математичних наук, професор

Офіційні опоненти - доктор фізико-математичних наук, професор Мельничук С.В.,
доктор фізико-математичних наук, професор Корбутяк Д.В.

Провідна організація - Львівський державний університет ім.І.Франка.

Захист дисертації відбудеться "27" жовтня 1995 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 07.01.06 при Чернівецькому державному університеті ім.Д.Гедьковича за адресою: 274012, м.Чернівці, вул.Університетська,2, велика фізична аудиторія.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці університету, вул.Л.Українки,23.

Автореферат розісланий "25" вересня 1995 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради

Курганецький М.В.

ЛНБ ім. В. Стефаніка

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність теми. Останніми роками в фізиці напівпровідників можна спостерігати значне наукове зацікавлення до нового класу напівпровідникових матеріалів - напівмагнітних напівпровідників, вивчення яких почалося порівняно недавно. До них належать кристали леговані Zd-йонами перехідних металів, або тверді розчини, які містять магнітну компоненту. Основна відмінність напівмагнітних напівпровідників від звичайних напівпровідників полягає в наявності обмінної взаємодії між магнітними моментами магнітної компоненти і зонними носіями заряду, яка проявляється при накладанні зовнішнього магнітного поля. Ця особливість призводить до великих спінових та орбітальних розщеплень зонних станів електронів, ліній, екситонів та до прояву гігантського магнітооптичного ефекту Фарадея.

Серед напівмагнітних напівпровідників особливий інтерес викликають, як порівняно добре вивчені матеріали на основі марганцю (CdTe:Mn , $\text{Mn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$), так і менше дослідженні на основі заліза (CdTe:Fe , $\text{Fe}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$). Зокрема, останні напівпровідники мають більшу різноманітність фізичних властивостей в порівнянні з матеріалами на основі Mn. Це викликано тим, що йони Mn^{2+} в кристалі поведуть себе подібно вільним атомам, в той час йони Fe^{2+} модифікуються кристалічним полем. Велику інформативність для дослідження відзначених особливостей в таких матеріалах мають оптичні, магнітні та магнітооптичні вимірювання, результати яких представляють інтерес, як для фундаментальної науки так і з точки зору вирішення прикладних проблем. В зв'язку з цим зростає роль досліджень нових напівмагнітних напівпровідників на основі заліза та співставлення їх характеристик з матеріалами на основі марганцю.

Метою роботи було виявлення особливостей в магнітних, оптичних та магнітооптичних властивостях напівмагнітних напівпровідників на основі заліза та їх співставлення з відпо-

Відними характеристиками для матеріалів, які містять марганець.

При цьому були поставлені наступні основні завдання:

1. Вдосконалення і покращення технології синтезу і росту монокристалів CdTe:Mn , $\text{Mn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ і CdTe:Fe , $\text{Fe}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$, які підходять для проведення магнітних, оптичних та магніто-оптичних досліджень.

2. Вимірювання магнітної сприйнятливості CdTe:Mn , $\text{Mn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ і CdTe:Fe , $\text{Fe}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ для дослідження магнітної підсистеми в цих матеріалах.

3. Дослідження температурних, спектральних, польових залежностей магнітооптичних ефектів для визначення параметрів обмінної носій-фонної взаємодії.

4. Дослідження магнетизму локалізованих магнітних моментів в напівмагнітних напівпровідниках в широкому діапазоні зміни напруженості зовнішнього магнітного поля.

Для успішного розв'язання сформульованих вище завдань, за літературними даними було зроблено аналіз сучасних теоретичних представлень і експериментальних даних про обмінні ефекти в напівмагнітних напівпровідниках. Детальне вивчення температурних залежностей магнітної сприйнятливості, спектри оптичного поглинання, відбивання світла, ефекту Фарадея в широкому діапазоні магнітних полів та температур проводилося на кафедрі фізичної електроніки Чернівецького державного університету з використанням сучасних вимірювальних пристроїв.

Наукова новизна визначається сукупністю одержаних результатів, найголовніші з них:

1. Запропоновано модифіковані методики досліджень і обробки результатів вимірювань ефекту Фарадея в сильних імпульсних магнітних полях, за допомогою додаткового зрезка.

2. В роботі проведені порівняльні експериментальні дослідження магнітної сприйнятливості CdTe:Mn , $\text{Mn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ і CdTe:Fe , $\text{Fe}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$. Для пояснення отриманих результатів використано кластерну модель, в якій антиферомагнітна взаємо-

дія між магнітними моментами відбувається через збуджені стани атомів телура. З досліджень магнітної сприйнятливості матеріалів на основі заліза зроблено висновок про вплив на неї електронних переходів в енергетичній структурі йонів Fe^{2+} .

3. Вперше визначено суму обмінних інтегралів $sp-d$ -взаємодії для $Fe_xCd_{1-x}Te$ з досліджень температурних, спектральних, польових залежностей ефекту Фарадея, виявлено декілька типів вкладів в нього.

4. На основі отриманих результатів по ефекту Фарадея виявлено Ван-Флеківський парамагнетизм та анізотропію магнітних властивостей йонів Fe^{2+} в кубічних кристалах $Fe_xCd_{1-x}Te$, які пов'язані з розщепленням основного стану спин-орбітальною взаємодією та кристалічним полем в сильному магнітному полі.

На захист вноситься:

- модифікований метод дослідження ефекту Фарадея в напівмагнітних напівпровідниках в сильних імпульсних магнітних полях з використанням додаткового, "компенсуючого" зразка з діамагнітного матеріалу;

- особливості магнітної сприйнятливості кристалів твердих розчинів $Mn_xCd_{1-x}Te$, $Fe_xCd_{1-x}Te$, які пов'язані з структурою магнітної підсистеми, а також енергетичною структурою йонів Mn^{2+} та Fe^{2+} в таких матеріалах;

- результати дослідження обмінної взаємодії між локалізованими магнітними моментами та делокалізованими спінами вільних носіїв заряду в напівмагнітних напівпровідниках на основі заліза та їх співставлення з даними для класичних напівмагнітних напівпровідників, які містять магнітну компоненту Mn;

- результати дослідження магнетизму локалізованих магнітних моментів в напівмагнітних напівпровідниках на основі заліза за допомогою обмінної $sp-d$ -взаємодії, які виявили Ван-Флеківський парамагнетизм та анізотропію магнітних властивостей йонів Fe^{2+} .

Практична цінність. Враховуючи високу чутливість вимірювань магнітної сприйнятливості, екситонних спектрів досліджуваних кристалів, одержані результати можуть бути використані для контролю якості, визначення вмісту і розподілу магнітної компоненти в напівмагнітних напівпровідниках.

Виявлені в роботі магнітооптичні характеристики напівмагнітних напівпровідників можна використати для розробки на їх основі магнітооптичних пристроїв (модуляторів, оптичних вентиляторів, магнітооптичних датчиків і інших.)

Одержані результати досліджень магнітних, оптичних і магнітооптичних властивостей кристалів $Mn_{1-x}Cd_xTe$ і $Fe_{1-x}Cd_xTe$ стимулюють постановку подальших робіт по теоретичному і експериментальному вивченню такого роду матеріалів.

Достовірність отриманих результатів і зроблених на їх основі висновків базується на використанні високоточних методик, апробованих раніше на інших об'єктах, широкому використанні для обробки результатів вимірювань досконалої обчислювальної техніки, широким обговоренням результатів роботи на семінарах та конференціях.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи були апробовані і обговорювалися на наукових семінарах кафедри фізики напівпровідникових матеріалів Чернівецького державного університету, XI-XII Всесоюзних конференціях по фізиці напівпровідників (Кишинів, 1988, Київ, 1990), III Всесоюзній конференції по матеріалознавству халькогенідних напівпровідників (Чернівці, 1991), Міжнародній конференції по магнетиках (Міссурі, США, 1992), IX Міжнародній конференції по потрібних та багатоконпонентних сполуках (Якогама, Японія, 1993), IV Міжнародній конференції по фізиці і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1993).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 10 друкованих праць.

Об'єм і структура роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку ци-

тованої літератури, приміток, вміщує 142 сторінки машинописного тексту, 33 малюнки, 5 таблиць, 129 найменувань літературних джерел.

Особистий внесок дисертанта. Основні результати та висновки дисертації отримані автором. Постановка завдання та обговорювання результатів були виконані спільно з науковим керівником.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі подана загальна характеристика роботи, обговорюється актуальність проблеми, сформульовано мету, наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів та основні положення, які виносяться на захист в дисертації.

Перший розділ включає в себе огляд літератури. В ньому дається особливості зонної структури напівамагнітних напівпровідників на основі Mn і Fe, наявні відомості про оптичні і магнітних властивостях, впливу обмінних $sp-d$, $d-d$ взаємодій на магнітооптичні ефекти.

Ефекти обмінної взаємодії зільних носіїв заряду з локалізованими магнітними моментами та між самими магнітними моментами проявляються в магнітоелегованих металах та магнітних напівпровідниках. Але в металах на ці явища впливають колективні взаємодії в системі носіїв струму, а в магнітних напівпровідниках сильна взаємодія між самими магнітними моментами. В зв'язку з цим особливий інтерес представляють дослідження проявів обмінної взаємодії в напівпровідниках, які містять домішку магнітних іонів, або в твердих розчинах магнітних напівпровідників в немагнітних, тобто так званих напівамагнітних напівпровідниках. В цьому випадку ефекти $sp-d$, $d-d$ обмінної взаємодії виражені в більш чистому вигляді [1], а також мають практичне застосування.

В сплавках $M_x A_{1-x}^{II} B^{VI}$ існують два типи обмінних взаємодій. Сильна $sp-d$ взаємодія типу Кондо між спінами зонних електронів і локалізованими магнітними моментами домішки ро-

Оить значний вплив на електронні властивості, в той же час більш слабе міжонна гейзенберґівська d-d-взаємодія визначає статистичні та динамічні магнітні властивості.

В даному розділі розглянуто теоретичні аспекти обмінних взаємодій в широкозонних напівмагнітних напівпровідниках, а також їх прояв у магнітних та магнітооптичних властивостях.

Магнітні властивості напівмагнітних матеріалів на основі заліза мають властивості ван-Флеківського парамагнетика, що пов'язане з енергетичною структурою йонів Fe^{2+} , в той же час кристали на основі марґенцю поведуть себе, як звичайні К'юрі-Вейсовські парамагнетики.

Другий розділ еміає опис методики експериментів. В ньому викладені методи за допомогою яких вирочувались монокристали $CdTe:Mn$, $Mn_xCd_{1-x}Te$ і $CdTe:Fe$, $Fe_xCd_{1-x}Te$ та азе-дені схеми і опис устаток для вимірювання магнітної сприйнятливості, оптичних та магнітооптичних досліджень в стаціонарних та імпульсних магнітних полях. Вказані особливості низькотемпературних способів досліджень. Запропоновано модифіковану методику з використанням додаткового "компенсуючого" зразка для дослідження ефекту Фарадея в сильних імпульсних магнітних полях.

В третьому розділі розглянуто дослідження магнітних та оптичних властивостей напівмагнітних напівпровідників.

Дослідження магнітної сприйнятливості (χ) кристалів $Mn_xCd_{1-x}Te$ ($0 \leq x \leq 0,25$) методом Фарадея (Н-ЗКЕ) в інтервалі температур 77 - 300 К показали, що залежності $\chi_{Mn}^{-1} = f(T)$ в прямих лініях або складаються з ділянок різного нахилу, які описуються відповідно законом Кюрі або Кюрі-Вейса. Від'ємні значення парамагнітної температури Кюрі (θ) свідчать про антиферромагнітну взаємодію між атомами Mn. Магнітні параметри зразків $CdTe:Mn$, $Mn_xCd_{1-x}Te$ (θ , μ_{eff}) залежать від нахилу прямолінійних ділянок залежностей $\chi_{Mn}^{-1} = f(T)$, тому вони визначені для кожної з них (табл. I). Для пояснення залежностей $\chi_{Mn}^{-1} = f(T)$, найкраще підходить кластерна модель, яка враховує магнітні властивості кластерів різної форми, а

Таблиця I. Магнітні параметри зразків $Mn_xCd_{1-x}Te$.

n_{Mn}, x	T_c, K	θ, K	μ_{eff}, μ_B
10^{18} см^{-3}	-	0	5,92
0,008	120	0	5,81
		-30	5,92
0,011	120	0	5,75
		-48	5,92
0,052	156	-20	5,75
		-32	5,92
0,073	228	-40	5,47
		-85	5,92
0,10	200	-40	5,50
		-60	5,92
0,15	-	-105	5,92
0,25	-	-136	5,92

також йонів Mn^{2+} , які не взаємодіють між собою.

Можливими типами виділень другої фази і кластерів, які відповідають цим фазам, в даних кристалах є: $MnTe_2$ ($T_c = 87K$), металічний марганець ($T_c = 100K$) і $MnTe$ ($T_c = 307K$). Всі ці фа-

за - антиферомагнітні і їх наявність повинна приводити до особливостей на температурних залежностях магнітної сприйнятливості при вказаних температурах Нееля (T_C). В кластерах, які відносять до цих фазам, антиферомагнітна взаємодія проявляється слабше, ніж в самих фазах, і залежить від розмірів кластерів і температури. При збільшенні концентрації домішки і відповідно розмірів кластерів параметри θ і T_C , які їх характеризують, будуть збільшуватись, наближаючись до тих, які відповідають фазам: $MnTe_2$, металічного Mn або $MnTe$, а при виділенні цих фаз співпадут з ними.

Аналізуючи ці дані, можна зробити висновок, що найбільш ймовірними в кристалах $Mn_xCd_{1-x}Te$ є кластери типу Mn-Te-Mn-Te, які відповідають фазі $MnTe$. Таке припущення підтверджується наступним:

1. В твердих розчинах $Mn_xCd_{1-x}Te$ атоми Mn замінюють атоми Cd в вузлах кристалічної ґратки (ізовалентне заміщення).

2. Зломи, які спостерігаються на залежностях $\chi_{Mn}^{-1} = f(T)$, свідчать про магнітні фазові переходи в локальних областях зразків $Mn_xCd_{1-x}Te$ - кластерах, тобто переходи кластерів різних розмірів з магнітовпорядкованого в парамагнітний стан при підвищенні температури. Ці переходи знаходяться при $T \geq 100$ К. Тому, зломи не можуть бути пов'язані з переходами з антиферомагнітного в парамагнітний стан фаз $MnTe_2$ або Mn (тим більше відповідних їм кластерів), так як ці переходи для них проходять при $T \leq 100$ К.

При концентраціях менших $x=0,011$ іони Mn^{2+} не взаємодіють між собою, про що свідчить відсутність зломів. Збільшення θ з ростом x підтверджує припущення про те, що розміри кластерів збільшуються по мірі збільшення складу Mn в кристалах $Mn_xCd_{1-x}Te$. Відсутність зломів на залежностях $\chi_{Mn}^{-1} = f(T)$ для $x \geq 0,15$ пов'язано з появою взаємодії між самими кластерами, що характеризує поріг протікання.

Для аналізу температурних залежностей магнітної сприйнятливості були побудовані залежності $\chi_{Fe}^{-1} = f(T)$. Дані залеж-

ності апроксимували ділянками, які описуються законом Кюри - Вейса або Кюри. З даних залежностей визначали ефективний магнітний момент (μ_{eff}) іонів Fe^{2+} , а також температуру θ і температури зломів T_1 і T_2 . Аналіз проводився по відносній зміні μ_{eff} , позначивши за 100% максимальне значення магнітного моменту при високих температурах. В табл.2 T_1 і T_2 - температури зломів, а μ_1 , μ_2 , μ_3 - магнітні ефективні моменти визначені з відповідних прямолінійних ділянок. Температура зломів T_1 зі збільшенням концентрації магнітної домішки ($n_{Fe} = 5 \cdot 10^{17} - x = 0,03$) змінюється мало, в той же час температура зломів T_2 збільшується, а при $x \geq 0,01$ зломи при даних температурах відсутні.

Таблиця 2. Магнітні параметри кристалів $CdTe:Fe$ і $Fe_x Cd_{1-x} Te$.

n_{Fe}, x	$\mu_1, \%$	T_1, K	$\mu_2, \%$	T_2, K	$\mu_3, \%$
$5 \cdot 10^{17}$	46	120	69	212	100
$1 \cdot 10^{18}$	29	110	59	216	100
$3 \cdot 10^{18}$	49	150	59	250	100
$1 \cdot 10^{19}$	28	110	56	222	100
$1 \cdot 10^{20}$	30	114	69	218	100
0,01	25	128	-	-	100
0,03	34	120	-	-	100

Аналізуючи ці дані, можна зробити висновок про те, що найбільш ймовірною причиною зміни магнітного ефективного моменту (μ_{eff}) іонів Fe^{2+} є теплові переходи між рівнями сть-

нів ${}^6E({}^6\Gamma_3)$ і ${}^6T_2({}^6\Gamma_3)$. Таке припущення підтверджується слідуючим:

1. Дані особливості (зломи) на залежностях $\chi_{F_0}^{-1} = f(T)$ мають приблизно однакову температуру при різних концентраціях магнітної домішки.

2. Відсутність анізотропії намагніченості при $T \geq 40$ К свідчить про малу заселеність низькоелектронних рівнів стану ${}^6E({}^6\Gamma_3)$ і малу ймовірність переходів між ними.

3. Великі значення інтегралів d-d взаємодії між йонами Fe^{2+} в порівнянні з матеріалами на основі марганцю (для Mn -5,4К; для Fe -22К) приводить до неможливості ідентифікувати ці особливості, як переходи магнітних домішок з антиферомагнітного в парамагнітний стан.

В зв'язку з розбіжностями даних по залежностях енергії забороненої зони (E_g) від складу x в твердих розчинах $Fe_xCd_{1-x}Te$ були проведені оптичні дослідження цих матеріалів. Поєднання результатів вимірів спектрів екситонного відбивання і оптичного поглинання дозволило встановити емпіричну залежність для ширини забороненої зони (E_g), як функцію концентрації заліза в досліджуваних твердих розчинах:

$$E_g(x) = 1,605 + 0,2 \cdot x, \text{ при } T = 4,2 \text{ К; } 0 \leq x \leq 0,05.$$

В четвертому розділі викладені результати досліджень ефекту Фарадея в стаціонарних та сильних імпульсних магнітних полях при низьких температурах.

Проведено аналіз частотних залежностей ефекту Фарадея з використанням таких аналітичних виразів, як:

$$\theta = \frac{F_0^{1/2} d}{2 \pi c} \frac{E^2}{(E_0^2 - E^2)^{3/2}} \Delta E_0, \text{ де} \quad (1)$$

E - енергія фотонів; d - товщина зразка; π - постійна Планка; c - швидкість світла в вакуумі; E_0 - енергія переходів на екситонні рівні, F_0 - константа, яка характеризує силу ос-

цилятора екситонного переходу 1; ΔE_0 - розщеплення екситонних станів; i ,

$$\theta_i(E) = A_i (E_0 - E)^{-1/2}, \text{ де} \quad (2)$$

E_0 - ширина забороненої зони, A_i - константа, яка включає ефективні маси електронів і дірок, а також їх g -фактор. Вираз (1) описує екситонизм, а (2) - міжзонний ефект Фарадея.

Значно більша величина константи Верде в матеріалах на основі кадмію, ніж цинку найбільш ймовірно пов'язана з величезною силою осциляторного переходу в CdTe і ZnTe, так як величине інтегралів обмінної взаємодії для $Mn_x Cd_{1-x} Te$ менше ніж в $Mn_x Zn_{1-x} Te$ ($\alpha - \beta = 1,12$ еВ для $Mn_x Cd_{1-x} Te$ і $\alpha - \beta = 1,28$ еВ для $Mn_x Zn_{1-x} Te$). Величина сили осцилятора екситонного переходу в CdTe значно більша ніж в ZnTe. Аналогічна тенденція спостерігається і в ряді напівмагнітних кристалів пониженої симетрії $Mn_x Cd_{1-x} I_2$ та $Mn_x Pb_{1-x} I_2$.

Цікаві особливості виявлені в магнітопольових залежностях фарадеївського обертання в сильних імпульсних магнітних полях (до 250 кЕ). Розглядаючи дві сходинки при H_1 і H_2 , які експериментально спостерігаються у польових залежностях фарадеївського обертання, використовуючи наближення, згідно якому йони Mn^{2+} випадковим чином розподілені по катіонним вузлам, а також пропорційність між екситонним розщепленням ΔE_0 і намагніченістю магнітної підсистеми оцінювали константу обмінної взаємодії між йонами марганцю $J_{NN} = (-3,4 \pm 0,5)$ К Це значення близьке до величини визначеної з прямих вимірів намагніченості в даних кристалах.

При інтерпретації проведених досліджень для CdTe:Fe використовували порівняльний аналіз з аналогічними результатами для CdTe:Mn. Аналітично кут фарадеївського обертання в залежності від енергії фотонів в області екситонних переходів визначається виразом (1). Шляхом підстановки відомих з літератури параметрів для CdTe:Mn співставили експериментальні дані і співвідношення (1). Добре співпадання експе-

рименту і теорії одержано при значенні підгоночного параметру $F_0^{1/2} = 53 \cdot 10^{-20}$ град. Дж. З врахуванням того, що величина параметру $F_0^{1/2}$ визначається основною діамантною матрицею (тобто CdTe), допускали знайдене значення придатним для описання Фарадєвського обертання в кристалах CdTe:Fe. Послідує описування експериментальних даних і виразу (1) дало можливість оцінити для таких напівмагнітних напівпровідників величину інтегралу обмінної взаємодії між зонними носіями струму і локалізованими магнітними моментами.

Згідно [2], розщеплення екситонних станів ΔE_0 складається з суми двох вкладів:

$$\Delta E_0 = -\kappa \cdot N_0 (\alpha - \beta) \cdot \langle S_M \rangle + (g_e + g_h) \cdot \mu_B \cdot H, \text{ де} \quad (3)$$

α, β - обмінні інтеграли взаємодії магнітних іонів з електронами і дірками; $g_{e,h}$ - ефективні g-фактори електрона і дірки. Перший доданок в (3) описує вклад обмінної взаємодії магнітних іонів з зонними носіями в напівмагнітному напівпровіднику, а другий представляє собою звичайне земагітніське розщеплення зонних станів, характерне і для немагнітного кристалу CdTe. Наглядну ілюстрацію впливу цих двох членів в ΔE_0 дає магнітопольова залежність Фарадєвського обертання. Якщо в невеликих полях залежність $\theta/d(H)$ визначається головним чином обмінним вкладом в (3) і описується функцією Брілюєна, то з ростом напруженості магнітного поля починає переважати земагітніський вклад.

Вперше виявлено анізотропний ефект Фарадея в кубічному напівмагнітному напівпровіднику $Fe_{1-x}Cd_xTe$ обумовлений анізотропією намагніченості в цьому кристалі. Анізотропія Фарадєвського обертання також змінюється в залежності від температури кристалу. Привертає до себе увагу плато на двох кривих ($H_1(100)$ і $H_1(111)$) в інтервалі $5K \leq T \leq 15K$ і їх спінавання при $T \geq 40K$. Перша особливість обумовлена парамагнетизмом Ван-Флека напівмагнітних напівпровідників на ос-

нові заліза, для якого характерна незалежність намагніченості від температури в області гелієвих температур. Зниження анізотропії Фарадеївського обертання при вищих температурах пов'язано з тим, що низькотемпературна анізотропія обумовлена головним чином найбільш низькоенергетичними станами зони Fe^{2+} (дуплету 6T_4). З підвищенням температури проходить процес заселення більш високоенергетичних рівнів, що є причиною зниження анізотропії намагніченості енергетичної структури йонів Fe^{2+} .

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.

1. Запропонована модифікована методика дослідження ефекту Фарадея в сильних імпульсних магнітних полях, яка полягає в використанні додаткового "компенсуючого" зразка з діамантного матеріалу.

2. Встановлено, що в магнітній підсистемі кристалів $Mn_xCd_{1-x}Te$ основну роль в інтервалі температур 77 - 300 К при $0,008 \leq x \leq 0,15$ відіграють кластери типу $Mn-Te-Mn-Te$, які відповідають фазі $MnTe$. В цих кристалах антиферомагнітна взаємодія відбувається через збуджені атоми телура.

3. Виявлено, що в кристалах $Fe_xCd_{1-x}Te$ в інтервалі температур 120 - 140К зміна ефективного магнітного моменту пов'язана з електронними переходами ${}^6E - {}^6T_4$ в енергетичній структурі йонів Fe^{2+} .

4. На основі вимірів оптичного пропускання і спектрів екситонного відбивання твердих розчинів $Fe_xCd_{1-x}Te$ встановлено емпіричну залежність енергії забороненої зони від складу x:

$$E_g(x) = 1,606 + 0,2 \cdot x, \text{ при } T = 4,2 \text{ К}, 0 \leq x \leq 0,05.$$

5. Із аналізу спектральних залежностей ефекту Фарадея для кристалів $CdTe$, $Mn_xCd_{1-x}Te$, $Fe_xCd_{1-x}Te$ ($0 \leq x \leq 0,05$) встановлено, що в довгохвильовій області спектру ($E=1,35-$

1,45 eВ) переважає міксонний, а в області спектру E-I,45 - 1,55 eВ екситонний ефект Фарадея.

6. Досліджена динаміка магнітооптичних ефектів в залежності від сили осцилятора основного екситонного переходу в сполуках $Mn_x A_{1-x}^{2+} B^c$ (A - Cd, Zn; B - Te). Величина ефекту Фарадея в матеріалах на основі цинку менша, ніж в матеріалах на основі кадмію, що пояснюється значною силою осцилятора екситонного переходу в CdTe.

7. На основі досліджень ефекту Фарадея в сильних імпульсних магнітних полях (до 250 кЕ) в кристалах $Mn_x Cd_{1-x} Te$ оцінено константу обмінної взаємодії між йонами Mn^{2+} , яка дорівнює $J_{NN} = 5,4 \pm 0,6$ К.

8. В досліджень ефекту Фарадея в напівмагнітних напівпровідниках $Fe_x Cd_{1-x} Te$ встановлено різницю обмінних інтегралів взаємодії зонних носіїв струму з локалізованими магнітними моментами йонів $Fe^{2+} N_0$ ($\alpha - \beta$) = 1,50 eВ.

9. Ван-Флеківський пареманетизм та анізотропія ефекту Фарадея в сильних магнітних полях кристалів $Fe_x Cd_{1-x} Te$ обумовлені енергетичною структурою йонів Fe^{2+} . Зникнення анізотропії з підвищенням температури пов'язано з зменшенням заселеності низькоенергетичних рівнів дуплету 3T_2 .

Основні результати опубліковані в наступних роботах:

1. Н.П.Гавалешко, А.М.Савчук, П.И.Никитин, Б.Е.Деркач, О.Р.Кличук, О.В.Медынский. Эффект Фарадея в теллуриде кадмия легированном Fe. // Неорганические материалы.-1992.-т.28.- №12.- с.2429-2431.

2. A.I.Savchuk, B.E.Derkach, O.R.Klichuk, P.I.Nikitin. Faraday Rotation in Fe-Based Semimagnetic Semiconductors. // Magnetism.-1992.-v.28,N5.-Part.2.-p.3246-3248.

3. A.I.Savchuk, O.R.Klichuk, P.I.Nikitin. Anisotropic Faraday Rotation of cubic semimagnetic semiconductor CdFeTe. // Jpn.J.Appl.Phys.-1993.-v.32.-p.393-395.

4. Н.П.Гавалешко, О.Р.Кличук, П.Д.Марьянчук, А.М.Педалко, З.Н.Смерека. Особенности магнитных свойств полумагнитных

полупроводников $Mn_xCd_{1-x}Te$. // Тезисы докладов XI Всесоюзной конференции по физике полупроводников. - Кишинев. - октябрь 1988. - с.78.

Б. А.И.Савчук, В.Е.Деркач, Н.П.Гавалешко, О.Р.Кличук. Экситонн и эффект Фарадея в полумагнитных полупроводниках различной симметрии. // Тезисы докладов XII Всесоюзной конференции по физике полупроводников. - Киев. - 1990. - ч. I, с. 21-22.

Б. В.Е.Деркач, О.Р.Кличук, П.И.Никитин, А.И.Савчук, В.Н.Смерека. Оптические и магнитооптические исследования полумагнитных полупроводников $Hg_{1-x}Mn_xTe$, $Cd_{1-x}Hg_xMn_yTe$. // Тезисы докладов III Всесоюзной конференции "Материаловедение халькогенидных полупроводников". - Черновцы, 1991. - ч. I. - с. 77.

7. А.И.Савчук, М.П.Гавалешко, О.Р.Кличук, А.Н.Ляхович, С.В.Медвinsky. Оптические и магнитооптические исследования тонких пленок ПМП. // Тезисы докладов IV Международной конференции по физике и технологии тонких пленок. - Ивано-Франковск, 1993.

8. Н.П.Гавалешко, А.И.Савчук, П.И.Никитин, В.Е.Деркач, О.Р.Кличук. Эффект Фарадея в теллуриде кадмия легированном Fe. // Тезисы докладов III Всесоюзной конференции материаловедение халькогенидных полупроводников. - 1991. - Черновцы. - ч. I. - с. 77.

9. A. I. Savchuk, V. E. Derkach, O. R. Klichuk, P. I. Nikitin. Faraday Rotation in Fe-Based Semimagnetic Semiconductors. // Digests of the Intermag Conference. - 1992. - St. Louis, Missouri, USA.

10. A. I. Savchuk, O. R. Klichuk, P. I. Nikitin. Anisotropic Faraday Rotation of cubic semimagnetic semiconductors $CdFeTe$. // Abstracts ICTMO-9. - 1993. - Yokohama, Japan.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.

1. Полумагнитные полупроводники. / Под ред. Я.Фурлыни и Я.Косуца. - М.: Мир, 1992. - 496 с.

2. П.И.Никитин, А.И.Савчук. Эффект Фарадея в полуметаллических полупроводниках. // УФН.-1990.-т.160,№1.-с.167-169.

Кличук О.Р. "Обменные эффекты в широкозонных полуметаллических полупроводниках на основе соединений $A^{II}B^{VI}$ ".

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - Физика полупроводников и диэлектриков, Черновицкий государственный университет, Черновцы, 1995.

Заявляется 10 научных работ, в которых проведено исследование температурных зависимостей магнитной восприимчивости кристаллов $Mn_xCd_{1-x}Te$, $Fe_xCd_{1-x}Te$, а также частотных, полярых, температурных зависимостей эффекта Фарадея. Впервые определена константа обменного s,p-d-взаимодействия для кристаллов $Fe_xCd_{1-x}Te$, а также обнаружено анизотропное эффекта Фарадея в этих полуметаллических полупроводниках.

Klichuk O.R. "Exchange Effects in Wide-band-gap Semimagnetic Semiconductors Based on $A^{II}B^{VI}$ Compounds".

The thesis for obtaining the degree of candidate of physical and mathematical sciences on the speciality 01.04.10 - Physics of semiconductors and insulators. Chernivtsi State University. Chernivtsi. 1995.

10 scientific works are presented for defence, which contain investigation of temperature dependence magnetic susceptibility of $Mn_xCd_{1-x}Te$ and $Fe_xCd_{1-x}Te$, the dependence of Faraday rotation upon the radiation wavelength, the temperature and magnetic field for these crystals. For the first time the value of s,p-d exchange constant for $Fe_xCd_{1-x}Te$ crystals is determined and the anisotropic Faraday Effect in this cubic semimagnetic semiconductor is observed.

Ключові слова: анізотропія, обмінна константа, магнітна сприйнятливість, ефект Фарадея, нелінійно-магнітний напівпровідник, обмінний ефект.

LIBRARY OF THE
CHERNIVTSI STATE UNIVERSITY

Підписано до друку 19.09.05
Формат 60 x 84/16
Папір друкарський
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 1,1
Обл.- вид. арк. 1,0.
Зам. 273

Друкарня видавництва "Рута" Чернівецького держуніверситету
274012, Чернівці, вул. Коцюбинського, 2.

443583

Ar 33.082
AB 33.082