На правах рукописи

АРСЛАНОВ Темирлан Расулович

КИНЕТИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА РАЗБАВЛЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ ДО 7 ГПа

01.04.07. - физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Махачкала - 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук

Научные руководители: член-корреспондент РАН
Камилов Ибрагимхан Камилович

кандидат физико-математических наук
Моллаев Ахмедбек Юсуфович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Бражкин Вадим Вениаминович

кандидат физико-математических наук
Алиев Ахмед Магомедович

Ведущая организация: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

Защита состоится « 17 » ноября 2011 г. в 15^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 002.095.01 при Институте физики Дагестанского научного центра РАН по адресу:
367003, РФ, Дагестан, Махачкала, пр. Шамиля, 39-а.

Отзывы на автореферат просьба направлять по адресу:
367003, РФ, Дагестан, Махачкала, ул. М. Ярагского, 94, Учреждение Российской академии наук Институт физики ДНЦ РАН, секретарю диссертационного совета.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики ДНЦ РАН

Автореферат разослан « 10 » октября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 002.095.01
доктор физико-математических наук А.Б. Батдалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Новым перспективным направлением твердотельной электроники становится спиновая электроника (спинтроника), где наряду с зарядом спин электрона представляет собой активный элемент для хранения и передачи информации, формирования интегральных и функциональных микросхем, конструирования новых магнето-оптоэлектронных приборов. Использование в устройствах спинтроники как ферромагнитных, так и полупроводниковых свойств материала, то есть спина и заряда его электронов, выдвигает на первый план задачу поиска, синтеза и исследования новых высокотемпературных ферромагнитных полупроводников (разбавленных магнитных полупроводников) с высокоподвижными поляризованными носителями тока [1]. Наиболее изученным представителем этого класса материалов является $Ga_{1-x}Mn_xAs$, в котором был обнаружен ферромагнетизм с температурой Кюри T_C, не превышающей 170 K [2, 3].

Тройные полупроводники $A^{II}B^{IV}C_2^{V}$ являются кристаллохимическим и электронным аналогом полупроводников $A^{III}B^{V}$ и могут найти применение в спинтронике. В матрице $A^{II}B^{IV}C^{V}_2$ в зависимости от степени легирования переходные элементы (в частности Mn) могут замещать в различных пропорциях как позиции элементов второй группы A^{II} (Cd, Zn), так и позиции элементов четвертой группы B^{IV} (Ge). Магнетизм в разбавленных магнитных полупроводниках (РМП) дырочного типа на основе матриц $A^{II}B^{IV}C^{V}_2$ формируется в результате конкуренции двух противоположных механизмов: антиферромагнитного сверхобменного взаимодействия Mn^{2+}-Mn^{2+} и ферромагнитного двойного обменного взаимодействия Mn^{2+}-Mn^{3+} [4, 5]. При низких концентрациях ионов марганца доминирует первый механизм, приводя к состоянию типа спинового стекла, а для случая с относительно высокой концентрацией ионов марганца, когда происходит частичное замещение ионов Ge^{4+} ионами Mn^{3+}, доминирует второй механизм обменных взаимодействий,

проявляющийся в ферромагнетизме. Стоит отметить важную роль вакансий и нестехиометрии в формировании ферромагнетизма в этих РМП. Для системы $CdGeP_2$:Mn показано, что наличие в ней вакансий типа (Cd, V_C,Mn)GeP_2 или нестехиометрии типа (Cd, Ge, Mn) GeP_2 делает энергетически более выгодным ФМ-состояние, чем состояние спинового стекла [6].

В качестве объектов исследования были выбраны высокотемпературные ферромагнитные полупроводники $CdGeAs_2$:Mn и $CdGeP_2$:Mn. На основе $CdGeP_2$:Mn был впервые синтезирован высокотемпературный ферромагнетик [7]. Интерес к $CdGeAs_2$ и $CdGeP_2$ обусловлен возможностью легирования алмазоподобных матриц переходными элементами (Mn, Fe, Cr и др.) в довольно широких пределах, высокой подвижностью носителей дырочного типа, высокими температурами Кюри, а также технологичностью их получения в виде качественных моно и поликристаллов. Поскольку характер легирования и наличие свободных носителей заряда определяют не только кинетические свойства, но и магнитные свойства таких материалов то, эффективно воздействуя давлением, можно изучать процессы, происходящие в высокотемпературных ФМ полупроводниках.

Цель работы. Экспериментальное исследование влияния высокого давления до 7 ГПа на кинетические и магнитные свойства разбавленных магнитных полупроводников $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с различным содержанием Mn.

В рамках этой цели решались следующие задачи:

1. Разработать методики измерения удельного электросопротивления, коэффициента Холла, магнетосопротивления, относительной магнитной восприимчивости и относительного объема при высоком давлении до 7 ГПа и комнатной температуре;
2. Измерить при атмосферном давлении в интервале температур 77.6 – 420 K и магнитных полей $H \leq 10$ кЭ удельное электросопротивление и коэффициент Холла в разбавленных магнитных полупроводниках $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с различным содержанием марганца

3. Получить и проанализировать новые экспериментальные данные о влиянии высокого давления до 7 ГПа, при комнатной температуре на кинетические и магнитные свойства разбавленных магнитных полупроводников $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$, $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ и.т.д. с различным содержанием Mn.

Научная новизна состоит в том, что впервые:

- проведены исследования температурных и магнетополевых зависимостей коэффициента Холла при атмосферном давлении в разбавленных магнитных полупроводников $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с различным содержанием Mn, которые позволили определить тип, подвижность и концентрацию носителей заряда. Выделены нормальная и аномальная составляющая коэффициентов Холла в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ с (x=0.18, 0.24 и 0.30);
- обнаружено индуцированное высоким давлением отрицательное магнетосопротивление в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с различным содержанием Mn. Выявлена взаимосвязь магнетосопротивления с магнитными свойствами исследованных образцов;
- обнаружено, что в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с различным содержанием Mn вблизи температуры магнитного упорядочения индуцируется давлением метамагнитный переход из состояния с низкой намагниченностью в состояние с высокой намагниченностью;
- обнаружен индуцированный высоким давлением магнетообъемный эффект в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с различным содержанием Mn.

Практическая и научная ценность работы. Полученные в диссертации данные о влиянии давления на электрические и магнитные свойства образцов $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ могут быть полезны для дальнейшего целенаправленного исследования свойств этих материалов путем воздействия высоких давлений. Усовершенствованное устройство для исследования кинетических и магнитных свойств твердых тел при высоком давлении, а также экспериментальные методы создания гидростатического давления до 7 ГПа и измерения удельного сопротивления, коэффициента Холла,

магнетосопротивления, относительной магнитной восприимчивости и относительной объемной сжимаемости в этих условиях могут применяться для решения ряда фундаментальных и прикладных задач. В частности, метод точного измерения давления при комнатной температуре может применяться для контроля и управления давлением в технологических процессах получения новых материалов при высоких давлениях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования эффекта Холла в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с различным содержанием Mn в диапазоне температур 77.6 ÷420 K и магнитных полей H≤10 кЭ при атмосферном давлении.
2. Результаты исследования магнетосопротивления в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ при высоком давлении до 7 ГПа.
3. Результаты исследования относительной магнитной восприимчивости в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с различным содержанием Mn при высоком давлении до 7 ГПа.
4. Результаты исследования относительного объема в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с различным содержанием Mn при высоком давлении до 7 ГПа.

Вклад автора. В цикле исследований, составляющих данную диссертационную работу, автору принадлежит основная роль в критическом анализе имеющихся литературных данных, постановке задачи, организации и проведении экспериментов, интерпретации и анализе полученных результатов, формировании основных положений и выводов, а также в написании диссертации.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на: 13-ой Международной конференции «Высокие давления и физика полупроводников» (HPSP 13) (Форталеза, Бразилия, 2008); Международном симпозиуме «Упорядочение в минералах и сплавах» (г. Ростов-на-Дону, п. Лоо, 2008, 2009 гг.); IX Международном семинаре «Магнитные фазовые переходы» (Махачкала, 2009); Международной конференции «Европейской

исследовательской группы по материалам» (E-MRS) (Варшава, Польша, 2009); Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2009)» (Минск. 2009); 4-ой Международной научно-технической конференции «Сенсорная электроника и микросистемные технологии» СЭМСТ-4 (г. Одесса, 2010); 48-ой Международной Европейской конференции по высоким давлениям (Упсала, Швеция, 2010); Международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах», посвященной 75-летию член-корреспондента РАН И.К.Камилова (Махачкала, 2010).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень изданий ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и выводов, списка цитированной литературы из 161 наименования. Содержание работы изложено на 133 страницах, включая 54 рисунка и 13 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбора темы диссертации и объектов исследования.

В первой главе приведен обзор данных по разбавленным магнитным полупроводникам (РМП) на основе соединений $A^{II}B^{IV}C_V^2$ ($CdGeAs_2$, $CdGeP_2$, $ZnGeAs_2$, $ZnGeP_2$), легированных марганцем. Анализ кристаллической структуры соединений $A^{II}B^{IV}C^{V}_2$ показал, что они могут растворять значительные количества атомов d-элементов (в частности Mn), т.к. длина связей Mn-C^V сопоставима с длинами связей A^{II} – C^V и B^{IV} – C^V, и как следствие предполагается, что на их основе могут быть получены ферромагнетики с высокими температурами Кюри.

Во второй главе рассмотрены методики создания и измерения высокого гидростатического давления до 9 ГПа с помощью аппарата типа «тороид» [8],

описаны методы измерения удельного сопротивления, коэффициента Холла, магнетосопротивления, относительной магнитной восприимчивости и относительной объемной сжимаемости. В начале главы приведен обзор известных методов создания гидростатического давления P>3 ГПа с помощью аппаратов типа поршень-цилиндр, «белт» и многопуанссонных аппаратов. Рассмотрен принцип действия аппарата высокого давления типа «тороид» и обоснованы его преимущества перед аппаратами других типов.

Высокое гидростатическое давление передается на исследуемый образец жидкостью смеси метанола и этанола в отношении 4:1 при давлении до 9 ГПа. Жидкость находится в тефлоновой ампуле с конструкцией герметического затвора, который позволяет ввести в ампулу до 8-12 электровводов. Описаны конструкции измерительных ячеек для изучения удельного сопротивления при комнатной температуре. Гидростатическое давление до 9 ГПа измерялось манганиновыми датчиками, барический коэффициент сопротивления которых определялся в каждом эксперименте по давлениям фазовых переходов в висмуте (2,54; 2,7 и 7.7 ГПа). Рассмотрены метрологические свойства этих датчиков в жидких и затвердевающих под давлением средах, проведено сравнение с имеющимися в литературе данными. Сделаны оценки точности измерения давления и кинетических коэффициентов.

Измерение динамической магнитной восприимчивости проводилось регистрацией частоты резонансного контура, сердечником катушки которого является образец. Вариант использования автогенератора на основе такого контура для измерения динамической магнитной восприимчивости имеет свои преимущества, как для записи спектральных характеристик, так и для записи температурных и полевых зависимостей, а также зависимостей от приложенных внешних давлений. При переходе через точку ферромагнитного упорядочения или структурного перехода, его собственная частота изменяется в пределах от 2 МГц до 20 кГц. Измерения частоты автогенератора проводились с использованием частотомера. Магнитная проницаемость μ определялась из

условия равенства индуктивности тороидальной катушки (с числом витков N), намотанной на образец с индуктивностью, полученной из собственной частоты колебательного контура автогенератора:

$$\mu = \frac{\tau^2 \cdot 10^7}{8\pi^2 C N^2 h \ln b/a} \qquad (1)$$

где C – емкость конденсатора, τ – период колебаний, a, b, h – внутренний радиус, внешний радиус и высота тороидальной катушки. Магнитная восприимчивость рассчитывалась из выражения $\chi=(\mu-1)/4\pi$. При слабой выраженности эффекта, измерения осуществлялись в режиме накопления и усреднения. Такая методика оправдывается тем, что не приходится беспокоиться по поводу такого важного параметра измерительной установки для частотных измерений, как широта динамического диапазона.

Измерение относительной сжимаемости исследуемых образцов проводилось методом тензодатчика [9]. Метод основан на измерении электросопротивления участка тонкой константановой проволоки, приклеенной к образцу, помещенному в гидростатическую ячейку высокого давления. Особенность данной методики состоит в том, что чувствительный элемент тензодатчика почти во всем диапазоне давлений работает в режиме пластической деформации. Абсолютная точность измерения удельного объема для данной методики составляет 0.1%. Относительная точность (чувствительность измерений) составляет 10^{-3} %.

Третья глава посвящена описанию и анализу результатов экспериментального исследования кинетических и магнитных свойств разбавленного магнитного полупроводника $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ с ($0.06 \le x \le 0.3$) при атмосферном и высоком давлениях.

В разделе (3.1) рассмотрены результаты экспериментального исследования удельного электросопротивления, эффекта Холла и холловской подвижности в разбавленном магнитном полупроводнике $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ с ($0.06 \le x \le 0.3$) при атмосферном давлении в интервале температур 77.6÷420 К и магнитных полях $H \le 10$ кЭ. Некоторые характеристики исследованных образцов приведены в

таблице 1, где x - содержание марганца в процентах, T_C - температура Кюри, θ - парамагнитная температура Кюри, μ_B - магнитный момент, ρ - удельное электросопротивление, R_H - коэффициент Холла. Значения ρ и R_H приведены в таблице при T=297 K и атмосферном давлении.

Таблица 1. Магнитные и электрические свойства образцов $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$.

№ образца	Содержание Mn в образцах		Тип проводимости	T_C, K	θ, K	μ_B	ρ, Ом·см	R_H, $см^3$/Кл
	мас. %	x, ат. д.						
1	1	0.06	p	329	301	7.4	10	2250
2	3	0.18	p	329	329	8.0	2.3	90
3	4	0.24	p	355	325	8.0	0.25	7
4	5	0.30	p	355	325	8.0	0.03	0.8

На рис. 1 представлены кривые температурной зависимости удельного сопротивления ρ(T). Поликристалл $Cd_{0.94}Mn_{0.06}GeAs_2$ отличается от остальных поликристаллов тем, что его сопротивление значительно выше и в области низких температур носит полупроводниковый характер, тогда как в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ с (x=0.18, 0.24 и 0.30) при $T < T_C$ наблюдается металлический ход сопротивления с $d\rho/dT > 0$.

На рис. 2 в качестве примера представлены полевые зависимости сопротивления Холла R(H) для образца $Cd_{0.7}Mn_{0.3}GeAs_2$ (для остальных образцов картина аналогичная). В исследованном интервале температур R>0. В ферромагнитной области линейная зависимость R от H наблюдается при H> 2 kЭ.

На рис. 3 представлены температурные зависимости нормального R_0 и аномального R_S коэффициентов Холла, рассчитанные из кривых R(H). В исследованном интервале температур нормальный коэффициент Холла R_0 положителен, что указывает на преобладание дырочного вклада в проводимость. При T < 300 K коэффициент R_0 слабо зависит от температуры. При T > 300 K наблюдается значительный рост R_0, который заканчивается приблизительно при T ~ 340 K, а затем уменьшается. Аномальный коэффициент Холла R_S отрицателен и имеет минимум при T ~ 340 K. Следует отметить, что при T > 340 K,

коэффициенты Холла определяются со значительной (порядка 30%) погрешностью. Особенности вблизи T_C на кривых $R_0(T)$ и $R_S(T)$ не видны, однако производные dR_0/dT и dR_S/dT имеют экстремумы при $T>327$ K. На рис.4 показаны температурные зависимости холловской подвижности $\mu_H = R_0/\rho$. В $Cd_{0.82}Mn_{0.18}GeAs_2$, $Cd_{0.76}Mn_{0.24}GeAs_2$ и $Cd_{0.7}Mn_{0.3}GeAs_2$ зависимости $\mu_H(T)$ в области $T<270$ K, при росте температуры происходит уменьшение μ_H.

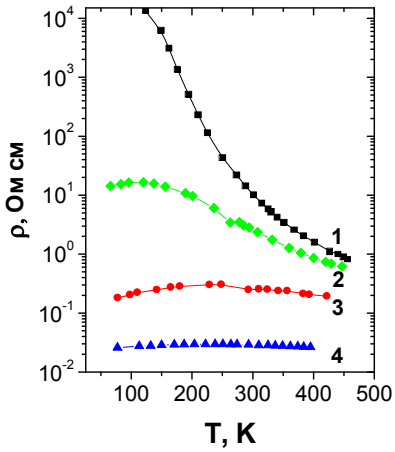

Рис.1. Температурные зависимости удельного электросопротивления ρ в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ для различных составов x: 1 - 0.06, 2 - 0.18, 3 - 0.24, 4 - 0.30.

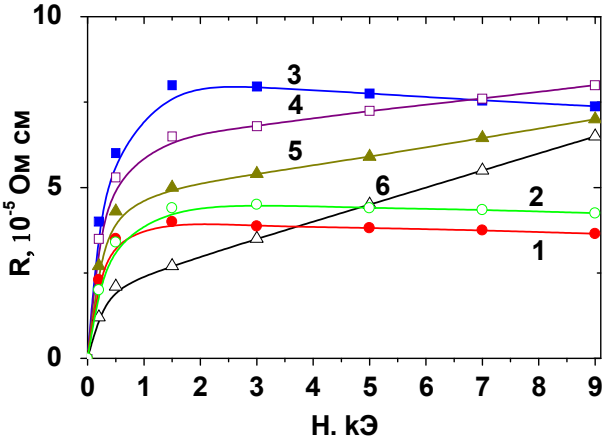

Рис.2. Изотермы сопротивления Холла *R* в $Cd_{0.7}Mn_{0.3}GeAs_2$ при различных температурах T(K): 1 – 96, 2 – 201, 3 – 278, 4 – 297, 5 – 315, 6 – 350.

Уменьшающаяся при росте температуры холловская подвижность (рис. 4), положительный и слабо зависящий от температуры коэффициент R_0 (рис. 3) указывают на то, что при $T<270$ K основными носителями тока в поликристаллах являются дырки, и рост сопротивления происходит из-за уменьшения их подвижности.

Таким образом, из анализа данных по эффекту Холла следует, что в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ с (x=0.18, 0.24 и 0.30) при низких температурах проводимость осуществляется, в основном, за счет перескоков между локализованными состояниями, а в окрестности T_C - за счет активации дырок на край подвижности.

В $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ с (x=0.18, 0.24 и 0.30) при T<270 K основными носителями тока являются дырки, находящиеся в металлическом состоянии, а рост сопротивления происходит из-за уменьшения их подвижности. При T>270 K температурная зависимость сопротивления обусловлена изменением концентрации носителей в делокализованных состояниях.

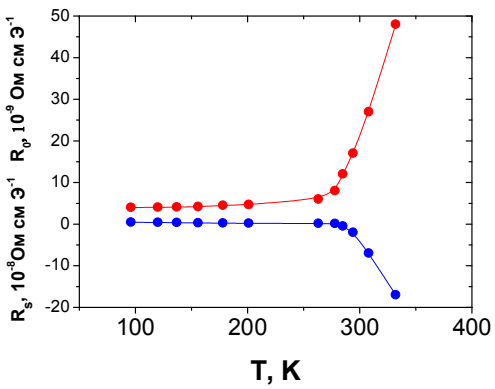

Рис.3. Температурная зависимость нормального R_0 и аномального R_S коэффициентов Холла в $Cd_{0.70}Mn_{0.30}GeAs_2$.

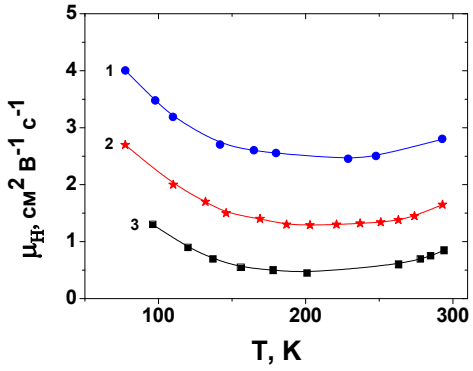

Рис.4. Температурные зависимости холловской подвижности $\mu_H=R_0/\rho$ в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ для различных составов x: 1 - 0.18, 2 - 0.24, 3 - 0.30.

В разделе 3.2 представлены результаты экспериментального исследования влияния высокого давления до 7 ГПа на кинетические и магнитные свойства $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ с ($0.06\le x\le 0.3$).

На рис.5 представлены барические зависимости поперечного магнетосопротивления $\Delta\rho_{xx}/\rho_o$, измеренные в магнитном поле H=5 кЭ для $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ с ($0.06\le x\le 0.3$). Увеличение давления и магнитного поля во всех исследованных поликристаллах приводит к росту положительного магнетосопротивления (ПМС), амплитуда которого достигает максимума в поле H=5 кЭ при P≥1 ГПа. Дальнейшее увеличение давления приводит к подавлению ПМС. При P≥2.5 ГПа магнетосопротивление становится отрицательным. В области фазового превращения отрицательное магнетосопротивление (ОМС) при давлении P>4.5 ГПа и магнитном поле H=5 кЭ составляет максимальное значение ~3% для образца $Cd_{0.7}Mn_{0.3}GeAs_2$. Наблюдаемое отрицательное

магнетосопротивление также говорит о взаимодействии носителей заряда с магнитными моментами ионов марганца (рис. 5).

Магнитная восприимчивость является одной из главных характеристик динамического состояния системы спинов. Фазовые переходы обычно характеризуются возникновением особенностей на температурной кривой зависимости магнитной восприимчивости. Наиболее интересной является область температур, непосредственно примыкающая к точке Кюри, так как именно здесь наблюдается наибольшее развитие флуктуаций и возникает дальний порядок.

На рис.6 представлены барические зависимости относительной магнитной восприимчивости для образцов $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ ($0.06 \le x \le 0.3$). Из рис.6 видно, что с увеличением процентного содержания марганца максимум $\chi(P)/\chi_0$ сдвигается в сторону низких давлений от P=2 ГПа для x=0.06 до P=1.6 ГПа для x=0.3. Амплитуда максимума наоборот растет с увеличением процентного содержания марганца.

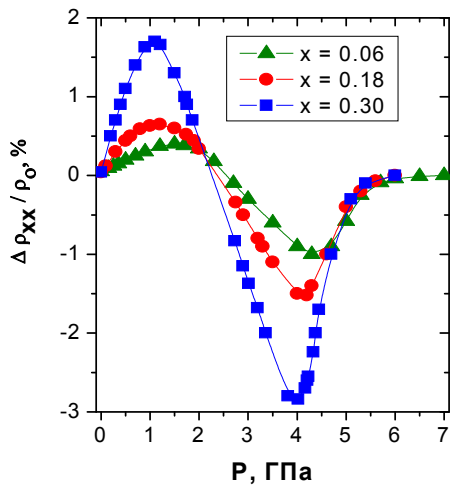

Рис.5. Барические зависимости поперечного магнетосопротивления $\Delta\rho_{xx}/\rho_o$, измеренные в магнитном поле H=5 кЭ для $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ с различным содержанием Mn.

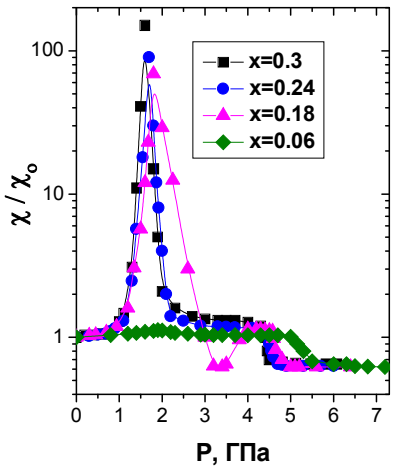

Рис.6. Барические зависимости относительной магнитной восприимчивости χ/χ_0 в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ с различным содержанием Mn.

Результаты измерений зависимостей относительного объема от давления в

$Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ показаны на рис. 7, 8. Исчезновение ферромагнитного состояния под давлением проявляется как резкое уменьшение сжимаемости решетки и рост объемного модуля B, начинающегося с P>4.5 ГПа. Объемный модуль растет в широком диапазоне давлений выше 4.5 ГПа и постепенно насыщается вплоть до 7 ГПа, что указывает на магнитное превращение при этом давлении. Нужно упомянуть, что рост объемного модуля в области, где ферромагнитное состояние исчезает, идет гладко, указывая на сосуществование ферромагнитных и парамагнитных областей в широких пределах давлений. Экстраполяция зависимости $\Delta V(P)/V_0$ из области высокого давления позволяет оценить значение объемной магнитострикции ω_S,. То есть объем решетки изменяется из-за самопроизвольной намагниченности ферромагнитной фазы. Значения ω_S при T=297 K для исследованных образцов $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ составляют (0.5÷1.7)%. Из рисунка 7 можно видеть, что уменьшение объема происходит почти линейно до P<4 ГПа, а при давлениях P≥1.5 ГПа наблюдается излом на кривых, обусловленный, вероятно, метамагнитным превращением.

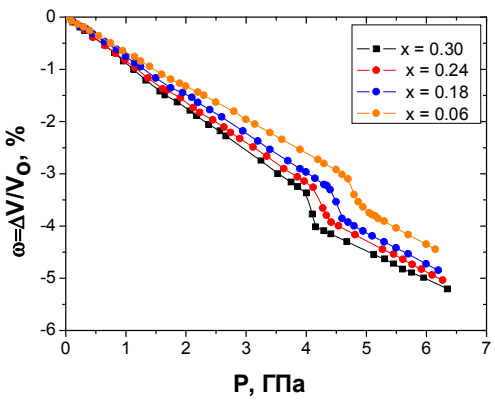

Рис.7. Барические зависимости относительного объема $\Delta V/V_0$ в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ с различным содержанием Mn.

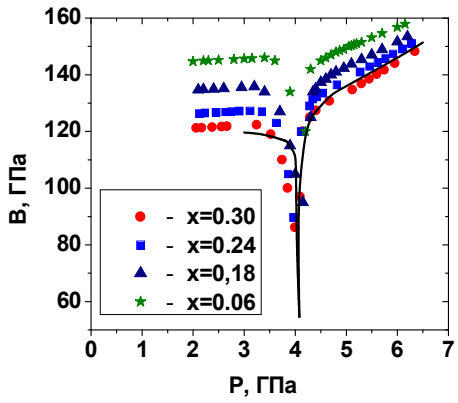

Рис.8. Барические зависимости объемного модуля B в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ с различным содержанием Mn. Сплошная линия - расчет по формуле (4) для образца с x= 0.3.

Однако объемный модуль $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ начинает падать при P>4 ГПа, и это смягчение становится значительным при дальнейшем увеличении давления (рис. 8). Значение объемного модуля при P=4.1 ГПа значительно меньше

первоначальной величины. Увеличение давления выше 4.1 ГПа приводит к значительному росту объемного модуля. Вообще зависимость объемного модуля (сжимаемости) проявляется как типичная λ - аномалия, которая происходит, очевидно, из-за магнитного превращения (исчезновение ферромагнетизма) при давлении около 4.1 ГПа. В результате компьютерной обработки получено выражение:

$$B \sim \left|1 - \frac{P}{P_C}\right|^{-b} + c\,, \qquad (4)$$

применяемое для анализа критических явлений. Здесь *b* - критический параметр и P_C - критическое давление.

Зависимость температуры Кюри от давления dT_C/dP в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ может быть оценена по известным значениям T_C и давлению перехода P_C (ФМ-ПМ) как $dT_C/dP=(T_C-T_{room})/P_C$. В таблице 2 приведены значения магнитных и магнитоупругих свойств, где T_C - температура Кюри, P_C - давление магнитного перехода ФМ-ПМ, P_{SR} - давление спинового упорядочения, ω_S - спонтанная магнитострикция, B - объемный модуль, вычисленный из экспериментальных результатов, приведенных на рис. 7. Значения B приведены в таблице при T=297 K и атмосферном давлении.

Таблица 2. Магнитные и магнитоупругие свойства образцов $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$.

№ обр.	x, ат. д.	T_C, K	P_C, ГПа	dT_C/dP, K/ГПа	P_{SR}, ГПа	ω_S, %	B, ГПа
1.	0.06	329	4,7	- 6.8	1.9	0.5	143
2.	0.18	329	4.3	- 7.5	1.8	0.8	133
3.	0.24	355	4.2	- 13.8	1.7	1.24	125
4.	0.30	355	4.1	- 14.0	1.6	1.7	120

Глава 4 посвящена исследованию кинетических и магнитных свойств $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ при атмосферном и высоком давлениях.

В разделе 4.1 рассмотрены результаты экспериментального исследования удельного электросопротивления и эффекта Холла в разбавленном магнитном полупроводнике $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с (x=0, 0.09 и 0.19) при атмосферном давлении в интервале температур 77.6÷420 К и магнитных полях H≤5 кЭ. Магнитные и электрофизические свойства измеренных образцов представлены в таблице 3, где x - содержание марганца в процентах, T_C - температура Кюри, θ - парамагнитная температура Кюри, μ_B - магнитный момент, ρ - удельное электросопротивление, R_H - коэффициент Холла. Значения ρ и R_H приведены в таблице при T=297 К и атмосферном давлении.

Таблица 3. Магнитные и электрические свойства образцов $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$.

№ образца	Содержание Mn в образцах		Тип проводимости	T_c, К	μ_B	ρ, Ом·см	R_H, $см^3$/Кл
	мас. %	x, ат. д.					
1	0	0	p	-	-	27.5	73.1
2	2	0.09	p	-	-	3.02	20
3	3	0.135	p	-	-	2	10
4	4.56	0.19	p	330	5.8	0.72	3
5	5	0.225	p	-	-	1530	$5\cdot10^3$

Результаты измерений температурных зависимостей удельного электросопротивления ρ(T) и коэффициента Холла $R_H(T)$ для образцов $Cd_{0.91}Mn_{0.09}GeP_2$ и $Cd_{0.81}Mn_{0.19}GeP_2$ p-типа представлены на рис. 9. Значение удельного сопротивления ρ для образца $Cd_{0.91}Mn_{0.09}GeP_2$ резко увеличивается с понижением температуры, причем lgρ пропорционален T, что типично для случая достаточно сильной компенсации. В образце $Cd_{0.81}Mn_{0.19}GeP_2$ с более высоким значением концентрации дырок при комнатной температуре удельное сопротивление уменьшается по абсолютной величине и при этом достаточно слабо зависит от температуры. Коэффициент Холла в области низких температур T≥160 К начиняет уменьшаться, что свидетельствует об участии в проводимости акцепторных уровней с энергией ионизации Ea≤0.02 эВ. Из температурных зависимостей ρ(T) и $R_H(T)$ следует, что образец $Cd_{0.91}Mn_{0.09}GeP_2$ в исследованном интервале температур имеет полупроводниковый характер, а образец

$Cd_{0.81}Mn_{0.19}GeP_2$ имеет металлическую проводимость.

В разделе 4.2 представлены результаты экспериментального исследования влияния высокого давления до 6 ГПа на кинетические и магнитные свойства $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с $(0.09 \le x \le 0.225)$. Измерены зависимости поперечного магнетосопротивления $\Delta\rho_{xx}(P)/\rho_o$, относительной магнитной восприимчивости $\chi(P)/\chi_0$ и относительного объема $\Delta V(P)/V_0$ при высоком гидростатическом давлении до 6 ГПа на поликристаллических образцах $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с $(0.09 \le x \le 0.225)$ в области комнатных температур. Во всех исследованных образцах $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с $(0.09 \le x \le 0.225)$ кроме базового $CdGeP_2$, наблюдалось поперечное магнетосопротивление, индуцированное давлением, которое сначала положительно и в области магнитного фазового перехода становится отрицательным (рис.10).

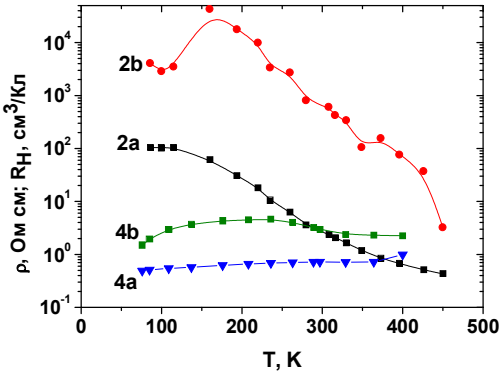

Рис 9 Температурные зависимости удельного электросопротивления ρ и коэффициента Холла R_H для $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с различным содержанием Mn: 2a - ρ (x=0.09), 4a - ρ (x=0.19), 2b - R_H (x=0.09), 4b - R_H (0.19).

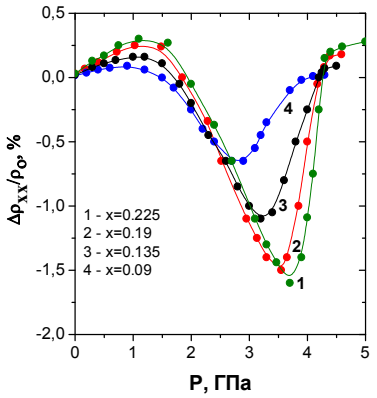

Рис. 10 Барическая зависимость поперечного магнетосопротивления $\Delta\rho_{xx}/\rho_0$ в магнитном поле H=5 кЭ для $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с различным содержанием Mn.

Увеличение давления и магнитного поля приводят к увеличению величины магнетосопротивления (рис.10). Во всех исследованных образцах $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с $(0.09 \le x \le 0.225)$ кроме базового $CdGeP_2$ наблюдались магнитные фазовые переходы при подъеме давления. С увеличением процентного содержания марганца, максимум $\chi(P)/\chi_0$ сдвигается в сторону высоких давлений (рис.11). Величина максимума растет с увеличением процентного содержания марганца.

Результаты измерений зависимостей относительного объема $\Delta V(P)/V_0$ от давления в $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с ($0.09 \geq x \leq 0.225$) показаны на рис. 12. На зависимостях $\Delta V(P)/V_0$ при $P>3.6$ ГПа обнаружены аномалии магнитных свойств. Полученные результаты, на наш взгляд, показывают, что во всех исследованных поликристаллах имеют место магнитные фазовые переходы. Вблизи критического давления $P_C>3.6$ ГПа, вероятно, имеет место переход из магнитоупорядоченной фазы в магнитонеупорядоченную фазу.

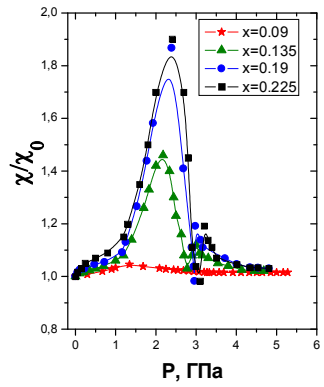

Рис. 11 Барические зависимости относительной магнитной восприимчивости χ/χ_0 для $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с различным содержанием Mn.

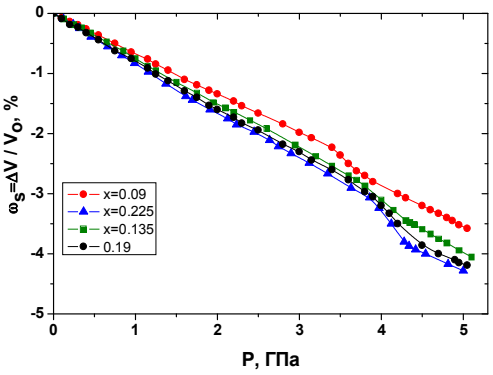

Рис. 12 Барические зависимости относительного объема $\Delta V/V_0$ для $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ с различным содержанием Mn.

Основные результаты и выводы

1. Впервые проведены исследования эффекта Холла в разбавленных магнитных полупроводниках $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ ($0.06 \leq x \leq 0.3$) и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ ($0.09 \leq x \leq 0.19$) при атмосферном давлении, что позволило определить тип, концентрацию, подвижность носителей заряда и их зависимость от температуры, состава и магнитного поля. Эксперимент показал, что механизм аномального уменьшения удельного электросопротивления и рост намагниченности связаны с ростом концентрации носителей заряда. Для $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ ($0.18 \leq x \leq 0.3$) путем графических построений из температурных и магнетополевых зависимостей

холловского сопротивления были рассчитаны температурные зависимости нормального и аномального коэффициентов Холла.

2. Исследования электрических свойств разбавленных магнитных полупроводников $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ ($0.06\leq x\leq 0.3$) и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ ($0.09\leq x\leq 0.225$), позволили обнаружить отрицательное магнетосопротивление, индуцированное высоким давлением, которое проявляется в магнитном поле $H\leq 5$ кЭ при комнатной температуре.

3. Из анализа барической зависимости относительной магнитной восприимчивости и относительного объема в разбавленных магнитных полупроводниках $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ ($0.06\leq x\leq 0.3$) и $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ ($0.09\leq x\leq 0.225$) установлено, что отрицательное магнетосопротивление связано с аномалиями магнитных свойств.

4. Впервые в $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ ($0.06\leq x\leq 0.3$) обнаружен метамагнитный переход, индуцированный давлением вблизи температуры магнитного упорядочения.

5. Впервые измерены зависимости относительного объема $\omega_S=\Delta V/V$ и относительной магнитной восприимчивости χ/χ_0 ферромагнитного полупроводника $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ ($0.06\leq x\leq 0.3$) при высоком давлении до 7 ГПа в области комнатных температур. На зависимостях χ/χ_0 и $\Delta V/V$ от давления, при $P\geq 1.6$ ГПа и $P\geq 4.3$ ГПа обнаружены аномалии магнитных свойств. Полученные результаты показывают, что имеют место переходы из низко намагниченного состояния в высоко намагниченное состояние вблизи критического давления $P_{SR}\geq 1.6$ ГПа и переход из магнитоупорядоченной фазы в магнитонеупорядоченную фазу при критическом давлении $P_C\geq 4.3$ ГПа. Воздействие высокого давления приводит к значительному уменьшению T_C с величиной $dT_C/dP\approx(-14.0 \div -6.8)$ К/ГПа. Расчеты объемного модуля B, проведенные с помощью выражения (4) позволили оценить значения объемного модуля в магнитоупорядоченной и магнитонеупорядоченной фазах.

6. Впервые измерены зависимости относительного объема $\omega_S=\Delta V/V$ ферромагнитного полупроводника $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ ($0.09\leq x\leq 0.225$) при высоком

давлении до 6 ГПа в области комнатных температур. На зависимостях $\Delta V(P)/V_0$ при P>3.6 ГПа обнаружены аномалии магнитных свойств. Полученные результаты показывают, что во всех исследованных поликристаллах имеют место магнитные фазовые переходы. Вблизи критического давления P_C>3.6 ГПа, имеет место переход из магнитоупорядоченной фазы в магнитонеупорядоченную фазу.

Материалы диссертации отражены в следующих основных публикациях:

1. Mollaev A.Yu., Kamilov I.K., Arslanov R.K., Zalibekov U.Z., Arslanov T.R., Bashirov R.R., Novotorzev V.M., and Marenkin S.F. Baric and temperature dependences of kinetic coefficients in p-$Cd_{0.7}Mn_{0.3}GeAs_2$ at atmospheric and high pressure // Phys. Status Solidi B. 2009. V.246, №3. P.655-657.
2. Моллаев А.Ю., Камилов И.К., Арсланов Р.К., Арсланов Т.Р., Залибеков У.З., Новоторцев В.М., Маренкин С.Ф. Магнитосопротивление в p-InAs:Mn и p-$CdGeAs_2$:Mn индуцированное высоким давлением // Известия РАН. Серия Физическая. 2009. Т.73, №7. С.1048-1050.
3. Моллаев А.Ю., Камилов И.К., Арсланов Р.К., Арсланов Т.Р., Залибеков У.З., Новоторцев В.М., Маренкин С.Ф. Индуцированный высоким давлением метамагнитный переход в ферромагнитном полупроводнике $Cd_{0.7}Mn_{0.3}GeAs_2$ // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т.91, В.9. С.524-526.
4. Моллаев А.Ю., Камилов И.К., Арсланов Р.К., Залибеков У.З., Арсланов Т.Р., Ибаев Э.С., Новоторцев В.М., Маренкин С.Ф. Зависимости электрофизических свойств $Cd_{0.7}Mn_{0.3}GeAs_2$ от давления, температуры и напряженности магнитного поля // Неорганические материалы. 2010. Т.46, №6. С.645-648.
5. Моллаев А.Ю., Камилов И.К., Маренкин С.Ф., Арсланов Р.К., Залибеков У.З., Арсланов Т.Р., Абдуллаев А.А., Федорченко И.В. Магнитные фазовые переходы и гальваномагнитные эффекты в

высокотемпературном ферромагнетике p-$Cd_{0.7}Mn_{0.3}GeAs_2$ при высоком давлении // Неорганические материалы. 2010. Т.46, №9. С.1029-1033.

6. Моллаев А.Ю., Камилов И.К., Маренкин С.Ф., Арсланов Р.К., Залибеков У.З., Арсланов Т.Р., Федорченко И.В. Влияние высоких давлений на электрические и магнитные свойства разбавленного магнитного полупроводника $Cd_{0.82}Mn_{0.18}GeAs_2$ // Журнал Неорганической химии. 2011. Т.56, №6. С.980-983.
7. Mollaev A.Yu., Kamilov I.K., Arslanov R.K, Marenkin S.F., Zalibekov U.Z. and Arslanov T.R. Electron and magnetic transport in the diluted magnetic semiconductor $CdGeAs_2$<Mn> at high pressures // High Pressure Research. 2011. V.31, №1. P.75–79.
8. Моллаев А.Ю., Камилов И.К., Арсланов Р.К., Новоторцев В.М., Маренкин С.Ф., Трухан В.М., Арсланов Т.Р., Залибеков У.З., Федорченко И.В. Объемная магнитострикция в разбавленном магнитном полупроводнике $Cd_{1-x}Mn_xGeAs_2$ (x=0.06–0.3) при высоких давлениях // Неорганические Материалы, 2011. Т.47, №11, С.1285 – 1288.

Литература, цитируемая в автореферате;

1. Иванов В.А., Аминов Т.Г., Новоторцев В.М., Калинников В.Т., Спинтроника и спинтронные материалы // Известия академии наук. Серия химическая. 2004 №11, С.2255-2303.
2. Edmonds K.M., Wang K.Y., Campion R.P., Neumann A.C., Farley N.R.S., Gallagher B.L., Foxon C.T. High-Curie-temperature $Ga_{1-x}Mn_xAs$ obtained by resistance-monitored annealing // Appl. Phys. Lett. 2002. V.81, P.4991 [3 pages].
3. Edmonds K.M., Boguslawski P., Wang K.Y., Campion R.P., Novikov S.N., Farley N.R.S., Gallagher B.L., Foxon C.T., Sawicki M., Dietl T., Buongiorno Nardelli M., Bernholc J. Mn Interstitial Diffusion in (Ga,Mn)As // Phys. Rev. Lett. 2004. V.92, P.037201 [4 pages].

4. Гуденко С.В., Аронзон Б.А., Иванов В.А. Изучение обменных взаимодействий ионов Mn в матрице $CdGeAs_2$ методом ЭПР // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т.82, В.8. С.591-597.
5. Zhao Y.-J., Geng W.T., Freeman A.J., Oguchi, T. Magnetism of chalcopyrite semiconductors: $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ // Phys. Rev. B 2001. V.63, № 20. P.201202 (R) [4 pages].
6. Sato K., Medvedkin G.A., Ishibashi T. Mitani S., Takanashi K., Ishida Y., Sarma D. D., Okabayashi J., Fujimori A., Kamatani T. and Akai H. Novel Mn-doped chalcopyrites // J. Phys. Chem. Sol., v.64, P.1461-1468 (2003).
7. Медведкин Г.А., Ишибаши Т., Ниши Т., Сато К, Новый магнитный полупроводник $Cd_{1-x}Mn_xGeP_2$ // Физика и техника полупроводников. 2001. Т.35, №3, С.305-309.
8. Khvosbantsev L.G., Vereshchagin L.P., Novikov A.P. Device of Toroid type for high pressure generation // High Temp-High Pressures., 1977. V.9, №6, P.637-639
9. Tsiok O.B., Bredikhin V.V., Sidorov V.A. and Khvostantsev L.G. Measurements of compressibility of solids and powder compacts by a strain gauge technique at hydrostatic pressure up to 9 GPa // High. Press. Res. 1992. V.10, P. 523-533.

Подписано в печать 07.10.2011г.
Формат 60х84 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная. Гарнитура «Times».
Печать офсетная. Тираж 100 экз. Заказ № 207

ГУП «Типография ДНЦ РАН»
367015, Махачкала, 5-й жилгородок, корпус 10.