

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

УДК 548.54

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ПРИ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ Zn

© 2023 г. П. Л. Подкур^{1,2}, И. С. Волчков^{1,*}, М. Д. Павлюк¹, В. Б. Кварталов¹,
Р. Б. Моргунов³, В. М. Каневский¹

¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

³Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

*E-mail: volch2862@gmail.com

Поступила в редакцию 07.07.2022 г.

После доработки 12.08.2022 г.

Принята к публикации 12.08.2022 г.

Модифицированным методом Обреимова–Шубникова получены поликристаллические слитки $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x = 0.005, 0.03, 0.05$). Отобранные монокристаллические блоки изучены методами рентгенофазового анализа, измерения электрических характеристик и магнитометрии. Исследована концентрационная зависимость изменения магнитных и электрических свойств кристаллов. Установлено, что при концентрации Zn ($x = 0.03, 0.05$) наблюдается ферромагнитное упорядочение в кластерах (включениях), содержащих железо и/или никель при 2 К, чего не наблюдается на образцах $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x = 0.005$).

DOI: 10.31857/S0023476123010216, EDN: DQOFHG

ВВЕДЕНИЕ

Теллурид кадмия CdTe является представителем класса широкозонных полупроводников и выделяется среди аналогов целым рядом свойств. Так, высокая плотность (5.85 г/см^3) и атомные номера компонентов, образующих CdTe (48 и 52 соответственно), приводят к высокому коэффициенту фотоэлектрического поглощения [1]. Высокая поглощающая способность материала позволяет создавать на его основе детекторы для широкого диапазона энергий от 0.005 до 10 МэВ [2], а возможность использования элементов меньших размеров приводит к увеличению пространственного разрешения и, соответственно, качества изображения [3–5]. Детекторы на основе CdTe применяются в ряде областей, таких как ядерный мониторинг [6], компьютерная томография [7, 8], в системах безопасности [9], спектрометрах/телескопах для рентгеновской визуализации (STIX) [10], а также для оснащения экспериментальных станций на источниках синхротронного излучения [1, 8, 11, 12, 17]. Важным преимуществом детекторов на основе CdTe является возможность работы при комнатной температуре [12]. Получение высокоомного монокристаллического материала на основе CdTe, необходимого для использования в качестве детекторного материала, весьма сложная, но чрезвычайно актуальная задача.

В общем случае широкозонные полупроводники с шириной запрещенной зоны $E_g > 1 \text{ эВ}$ должны обладать низкой проводимостью и являться диамагнитными. Это справедливо для идеальных стехиометричных кристаллов. Однако в реальности соединения $A_{II}B_{VI}$ являются фазами переменного состава, и отклонение состава кристаллов от стехиометрического вызывает образование собственных дефектов, таких как вакансии и межузельные атомы, и может приводить к изменению физических характеристик кристаллов. К таким же изменениям может приводить легирование различными примесями в процессе роста кристаллов CdTe, в результате которого отклонение от стехиометрического состава происходит путем образования дефектных комплексов, имеющих в своем составе примесные дефекты. Согласно [13–16] соединения на основе CdTe могут проявлять ферромагнитные свойства, обусловленные кластерами легирующего компонента. Поэтому определение связи между условиями роста и физическими свойствами полупроводниковых кристаллов представляет практический интерес.

В настоящее время кристаллы CdTe чаще применяют не в чистом виде, а в виде твердых растворов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ – перспективного материала для изготовления детекторов ионизирующего излучения, работающего при комнатной температуре.

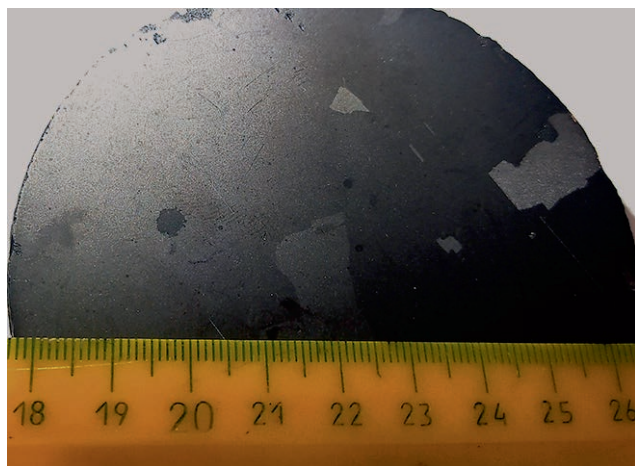


Рис. 1. Поликристаллический слиток образца CdZnTe. Хорошо заметна блочная структура слитка.

Введение Zn стабилизирует кадмиевую подрешетку CdTe [18, 19], улучшая структурные характеристики получаемых кристаллов. Данное соединение образует непрерывный ряд твердых растворов в квазибинарной системе CdTe–ZnTe [20], при этом увеличение концентрации Zn приводит к увеличению температуры плавления расплава. Поэтому качество кристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ будет существенно зависеть от условий роста. Замена в структуре CdTe атомов Cd атомами Zn позволяет увеличить ширину запрещенной зоны от 1.50 до 1.65 эВ при содержании Zn $x = 0.10$ и повысить удельное сопротивление кристаллов до 10^{11} Ом см [21–23]. Повышение содержания Zn в твердом растворе более чем $x > 0.12$ приводит к заметному ухудшению микроструктуры кристаллов [12], что обусловлено фазовой микронеоднородностью. То есть собственные и примесные дефекты в кристаллах приводят к изменению не только электрических [24], но и магнитных свойств [13]. Таким образом, для получения монокристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ с высоким структурным совершенством необходим прецизионный контроль концентрации Zn в кристаллах, чтобы не возникало деградации физических свойств. Для решения этой задачи требуются более подробные исследования зависимости свойств соединения $Cd_{1-x}Zn_xTe$ от его дефектной структуры, в том числе при низких концентрациях Zn, что и является целью данной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов исследования использовали поликристаллические слитки $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x = 0.005, 0.03, 0.05$), полученные модифициро-

ванным методом Обреимова–Шубникова [12, 25]. Шихта, используемая в процессе роста, состояла из предварительно синтезированного теллурида кадмия, к которому добавляли необходимое количество металлического Zn (марка ЧДА). Благодаря разработанной методике очистки исходных веществ элементарные Cd и Te имели чистоту не менее 10^{-7} мас. % [12, 26]. Элементный примесный состав образцов и содержание Zn контролировали методами энерго-дисперсионного анализа (ЭДС) с использованием растрового электронного микроскопа JCM-6000 PLUS Jeol (Япония) с приставкой для ЭДС-анализа и масс-спектрометром (МС) iCapQc Thermo Scientific (США) с ионизацией в индуктивно связанной плазме. Масс-спектрометр позволяет определять концентрации элементов в следовых количествах вплоть до 10^{-10} – 10^{-12} мас. %. Точный контроль примесного состава необходим из-за значительного влияния, оказываемого примесями на электрические и магнитные свойства кристаллов на основе CdTe [14–16, 27]. Фазовый состав выращенных образцов определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) на рентгеновском порошковом дифрактометре Miniflex 600 Rigaku (Япония, CuK_{α} -излучение) при комнатной температуре. Зависимости магнитного момента от поля $M(H)$ при разных температурах и его температурные зависимости $M(T)$ были получены с помощью СКВИД-магнитометра MPMS XL (Quantum Design, США) в диапазоне $T = 2$ – 350 К и $H = \pm 50$ кЭ. Выявленная блочность (рис. 1) связана с тепловыми условиями кристаллизации при монотонном охлаждении слитка со скоростью 3 К/ч. Все исследуемые кристаллы являлись кристаллами p -типа. Для исследований отбирали монокристаллические блоки, которые шлифовали и полировали. Образцы для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) представляли собой срезки двух монокристаллических блоков. Во избежание пробоя по границе блоков каждый участок обрабатывали по отдельности. Для измерения ВАХ образцы размером $5 \times 5 \times 2$ мм³ с золотыми электродами, нанесенными из водного раствора $AuCl_3$ на рабочие поверхности, образованные сколами по плоскостям спайности (110), помещали в светопроницаемую камеру. Перед непосредственным снятием ВАХ кристаллы выдерживали в течение 30 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты химического анализа на Zn, Fe и Ni в выращенных кристаллах, усредненные по областям, представлены табл. 1. Содержание остальных элементов в исследуемых кристаллах было ниже пределов чувствительности используемых методов. Присутствие элементов подгруппы железа вызвано использованием Zn низкой чистоты.

Таблица 1. Примесный состав кристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$

Элемент	Содержание примеси в исследуемом образце, ат. %					
	$Cd_{0.995}Zn_{0.005}Te$		$Cd_{0.97}Zn_{0.03}Te$		$Cd_{0.95}Zn_{0.05}Te$	
	ЭДС	МС	ЭДС	МС	ЭДС	МС
Zn		0.00038	1.6	1.61	2.38	2.52
Fe		0.00114		0.00226		0.00076
Ni		0.00082		0.00045		0.00079

ты, который не подвергался предварительной химической очистке. Содержание Zn в кристаллах оказывается существенно ниже вследствие более низкой температуры плавления Zn в сравнении с CdTe.

На рис. 2 представлены результаты РФА исследуемых образцов $Cd_{1-x}Zn_xTe$. Выращенные кристаллы $Cd_{1-x}Zn_xTe$ имеют структурный тип сфалерита (пр. гр. $F\bar{4}3m$). CdZnTe является бинарным соединением, представляющим собой твердый раствор CdTe + ат. % ZnTe. Поэтому процессы постростового охлаждения происходят аналогично тому, как они протекают в CdTe. Разные кристаллические блоки имели различный химический состав, что связано с особенностью кристаллизации твердого раствора. Так, в образ-

це $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x = 0.005$) присутствовали две кубические фазы CdTe с различными параметрами решетки ($a = 0.649$ и $a = 0.6481$ нм соответственно), в то время как образцы с $x = 0.03$ и 0.05 содержали одну и две фазы CdZnTe соответственно. Смещение пиков новой фазы в сторону больших углов с увеличением концентрации Zn свидетельствует об уменьшении параметра элементарной ячейки согласно правилу Вегарда, поскольку атомный радиус Zn (0.139 нм) меньше радиуса Cd (0.158 нм). Наличие в соединении фазовых переходов первого рода является причиной возникновения ряда трудностей при получении кристаллов с заданным химическим составом. Известно [12], что при охлаждении кристалла в интервале температур фазового перехода (рис. 3) появлению новой фазы сопутствует резкое изменение состава

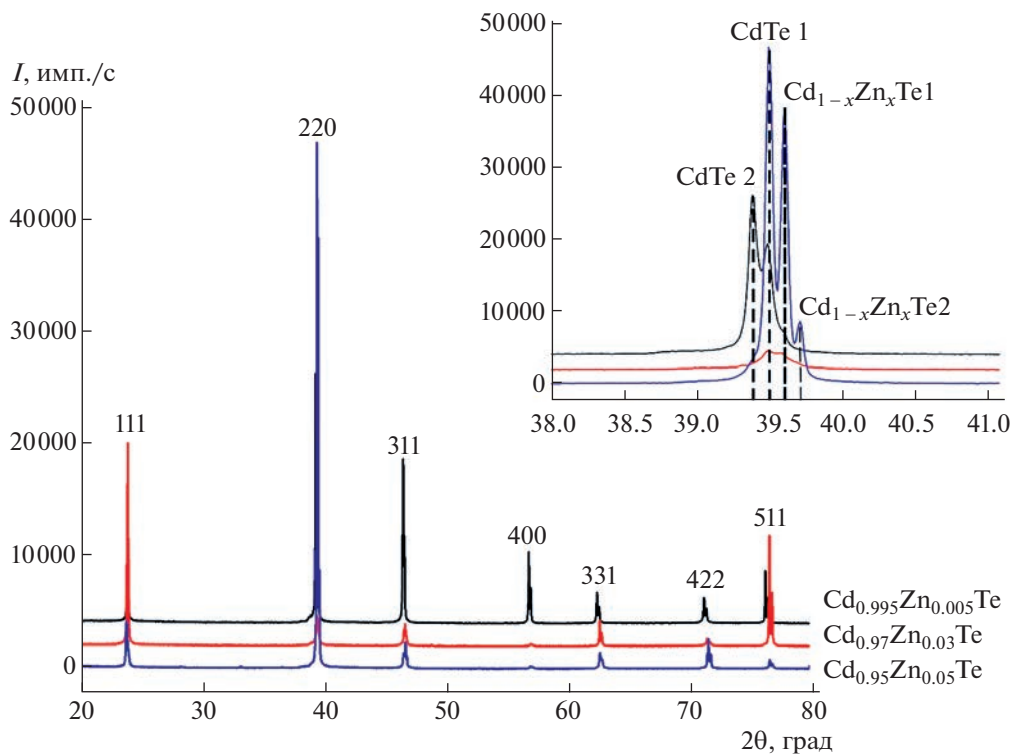


Рис. 2. Рентгенограммы порошка кристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x = 0.005, 0.03, 0.05$). На врезке увеличенная область $2\theta = 38^\circ-41^\circ$.

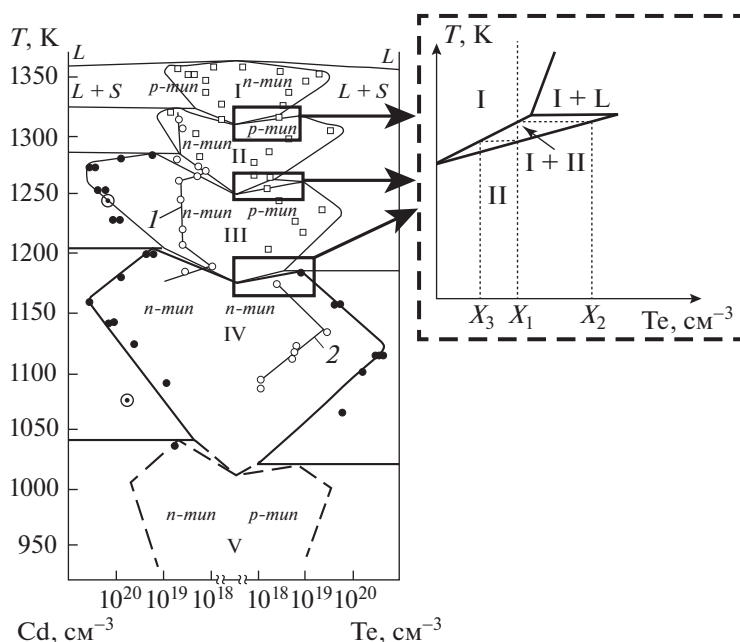


Рис. 3. Схематическое изображение на диаграмме фрагмента двухфазного состояния в интервале температур фазового перехода в процессе охлаждения кристалла CdTe [27, 28].

ва, т.е. исходный состав кристалла (фаза I) меняется при образовании фазы II от величины X_1 до величины X_2 . Изменение состава фазы II происходит при условии установления равновесия между твердыми фазами I и II, реализация которого возможна при очень низких скоростях охлаждения кристалла. При этих условиях обеспечивается диффузия атомов избыточного компонента из питающей фазы I к зарождающейся фазе II. Однако исходный состав (X_2) фазы II не остается постоянным и по мере ее образования в условиях медленного охлаждения стремится к величине (X_1). Можно предположить, что по аналогии с зарождением кристалла из жидкой фазы зарождение новой фазы происходит в объеме фазы I в местах скопления точечных и структурных дефектов. Таким образом, медленное охлаждение кристалла в интервале температур фазового перехода должно сопровождаться диффузионными потоками избыточного компонента, что в дальнейшем станет определяющим для электромагнитных свойств.

Электрические характеристики образцов, измеренные с помощью снятия ВАХ, показали, что образец $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0.005$) является низкоомным ($\sim 4 \times 10^3$ Ом см). Это связано с медленным охлаждением кристалла в интервале температур фазового перехода, и зарождение кристалла сопровождается диффузионными потоками избыточного компонента, которые в связи с постоянно изменяющейся концентрацией приводят к возникновению преципитатов и концентрацион-

ной микронеоднородности в кристалле. В результате возникает состояние очень высокого разупорядочения, в котором часть атомов попадает в междоузлия, образуя одновременно вакансии, занимающие не свойственные им узлы решетки. Это, в свою очередь, приводит к неоднородности электрических и оптических свойств кристалла. Образцы $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ имели смешанную блочную структуру. Так, блоки, состоящие из фазы CdTe, имели меньшее электрическое сопротивление ($\sim 4 \times 10^7$ и $\sim 2 \times 10^8$ Ом см для $\text{Cd}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{Te}$ и $\text{Cd}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}\text{Te}$ соответственно), чем блоки, состоящие из CdZnTe ($\sim 6 \times 10^8$ и $\sim 5 \times 10^8$ Ом см для $\text{Cd}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{Te}$ и $\text{Cd}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}\text{Te}$ соответственно).

Для измерений магнитного момента образцы вырезали из центра слитка таким образом, чтобы в них присутствовали два монокристаллических блока. На рис. 4 представлены температурные зависимости магнитного момента кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ в продольном магнитном поле 1 кЭ, ориентированном параллельно плоскости (110) кристаллов (с погрешностью $\pm 10^\circ$). Зависимости были получены в процессе нагрева образца, предварительно охлажденного в нулевом поле до 2 К.

Все исследуемые образцы имели отрицательный магнитный момент, поскольку являются диамагнетиками. При этом при критической температуре $T_{\text{crit}} \sim 245$ К на образце $\text{Cd}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{Te}$ наблюдается резкий скачок магнитного момента, который может быть связан с фазовым переходом. Наблюдаемое резкое увеличение магнитного

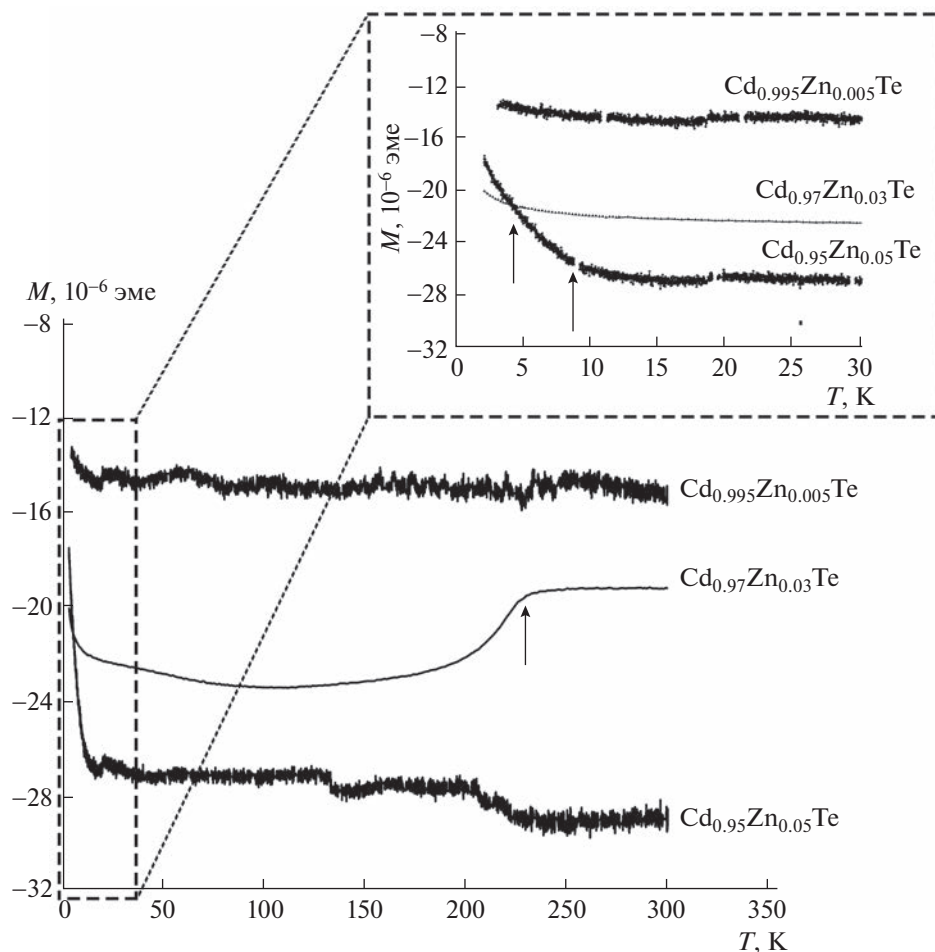


Рис. 4. Температурные зависимости магнитного момента образцов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ в магнитном поле, направленном вдоль плоскости (110) при 1 кЭ. На врезке увеличенная область в диапазоне температур 0–30 К.

момента при охлаждении ниже температуры $T_{crit} \sim 11$ К в образцах $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x = 0.03, 0.05$) было обнаружено и в [13], где связывали схожие аномалии магнитных свойств материалов с дефектами решетки, а именно с магнитными кластерами, образованными донорно-акцепторными парами типа (вакансии по Cd и Zn, замещающий Cd: $V_{Cd}-Zn_{Cd}$), дающими незначительный вклад в магнитный момент при высоких температурах в силу их малой концентрации. Однако при низких температурах в соответствии с законом Кюри их магнитный момент начинает сильно возрастать. При этом магнитные свойства образцов сильно не изменяются с увеличением содержания Zn, что в [13] связывают с входением в решетку атомов Zn, приводящим как к изменению электрического сопротивления [28], так и к магнитному упорядочению дефектов замещения после достижения определенной концентрации Zn. В данном случае этого упорядочения не наблюдается из-за малых концентраций Zn в исследуемых кристаллах. Более того, наблюдается уменьшение намаг-

нитненности с ростом содержания Zn, что коррелирует с увеличением электрического сопротивления при увеличении концентрации Zn.

При вычете диамагнитной составляющей кристаллической решетки петли гистерезиса $Cd_{0.97}Zn_{0.03}Te$ и $Cd_{0.95}Zn_{0.05}Te$ при 2 К имеют вид ферромагнитной петли (рис. 5б, 5в). Причем насыщение в образцах $Cd_{0.95}Zn_{0.05}Te$ наблюдается значительно раньше. В образцах $Cd_{0.995}Zn_{0.005}Te$ гистерезис не наблюдается. Наличие гистерезиса объясняется ферромагнитным упорядочением в кластерах (включениях), содержащих железо и/или никель. Отсутствие ферромагнитных петель гистерезиса для образцов $Cd_{0.995}Zn_{0.005}Te$, по видимому, объясняется особенностями условий роста, так как, несмотря на наличие примеси железа и никеля (табл. 1), не наблюдается агрегирования примесей Fe и Ni в кластеры. Косвенно это предположение подтверждается температурными зависимостями магнитного момента образцов (рис. 4), где на образцах $Cd_{0.97}Zn_{0.03}Te$ и

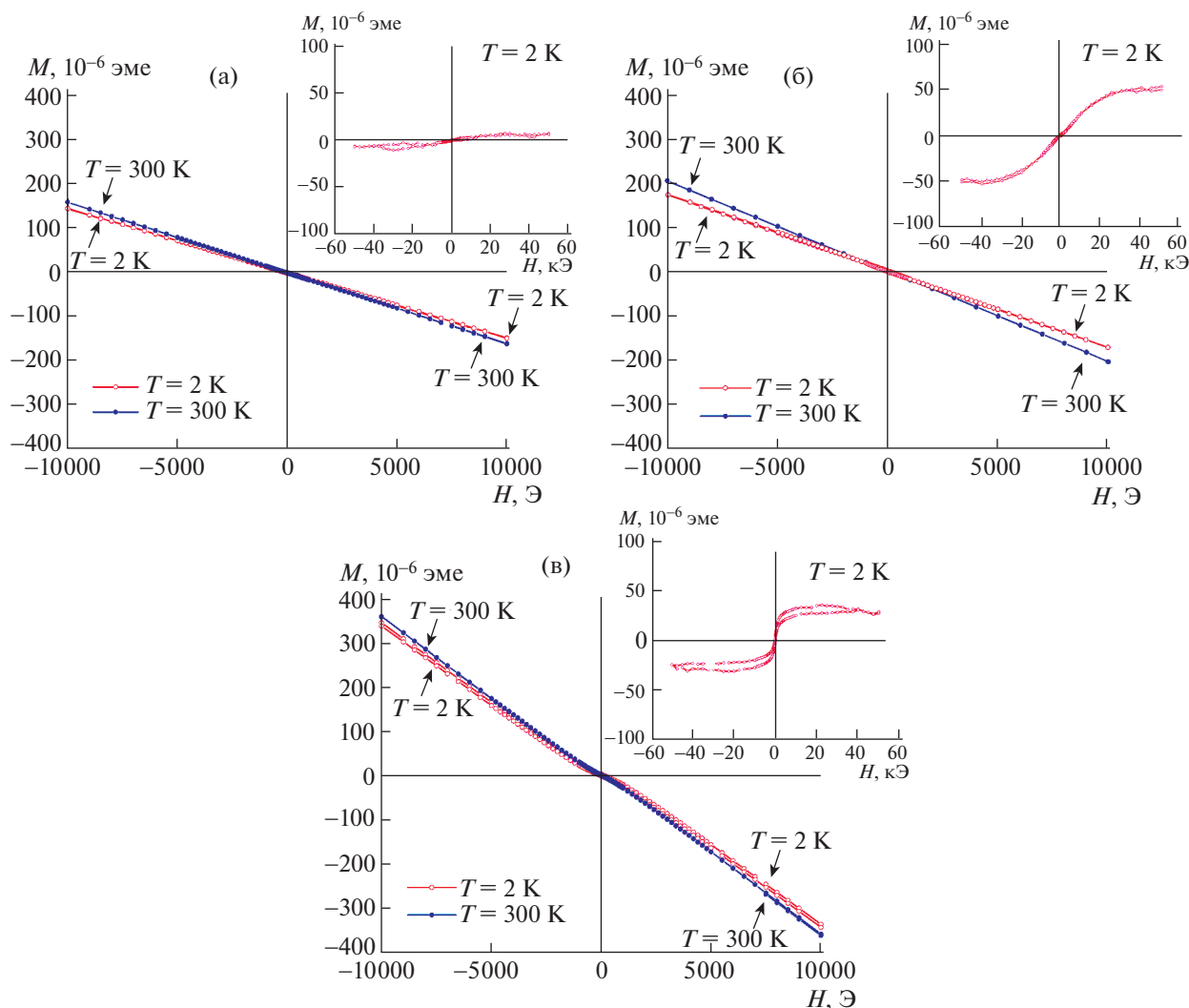


Рис. 5. Петли гистерезиса образцов $\text{Cd}_{0.995}\text{Zn}_{0.005}\text{Te}$ (а), $\text{Cd}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{Te}$ (б) и $\text{Cd}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}\text{Te}$ (в) при температурах 2 и 300 К. На врезках петли гистерезиса при 2 К за вычетом диамагнитного вклада кристаллической решетки.

$\text{Cd}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}\text{Te}$ наблюдается рост магнитного момента. В случае образца $\text{Cd}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}\text{Te}$ наблюдаемый рост более значителен. Для точного анализа происхождения ферромагнетизма, а также определения возможной анизотропии магнитных свойств необходимы дополнительные исследования при различной ориентации образца в магнитном поле. Для данных образцов подобные эксперименты не проводились в виду разориентировки монокристаллических блоков друг относительно друга. При анализе полученных данных можно утверждать, что кристаллы $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0.05$) обладают электрическими и магнитными свойствами, характерными для кристаллов CdZnTe [12, 13]. В кристаллах $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0.03$) не наблюдается ярко выраженных свойств CdZnTe , несмотря на наличие фазы CdZnTe , которая не является стабильной. Формирования устойчивой

фазы CdZnTe не происходит из-за условий роста кристаллов ввиду сложности диффузионных процессов роста. Очевидно, что по аналогии с механизмом образования фаз в $\text{Cd}_{0.995}\text{Zn}_{0.005}\text{Te}$, описанным выше, в процессе посткристаллизационного монотонного охлаждения закалка кристалла происходит не в однофазной, а в двухфазной области. В случае кристаллов $\text{Cd}_{0.97}\text{Zn}_{0.03}\text{Te}$ из-за малой концентрации Zn в процессе роста не происходит образования стабильной фазы CdZnTe .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модифицированным методом Обреимова–Шубникова получены поликристаллические слитки $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0.005, 0.03, 0.05$). Отобранные монокристаллические блоки изучены комплексом методов рентгенофазового анализа, измере-

ния электрических характеристик и магнитометрии. Исследована концентрационная зависимость изменения магнитных и электрических свойств кристаллов. Разные кристаллические блоки, закаляемые в процессе постростового охлаждения, имели различный химический состав, что подтверждено методом рентгеновского анализа. Для кристаллов CdZnTe с концентрацией ($x = 0.03$) образования устойчивой фазы CdZnTe не наблюдается. Установлено, что уже при концентрациях Zn ($x = 0.03, 0.05$) наблюдается ферромагнитное упорядочение в кластерах (включениях), содержащих железо и/или никель при 2 К, что позволяет рассматривать данные кристаллы как перспективные в качестве элементов спинтроники, а также расширяет спектр применения кристаллов CdZnTe и требует дальнейшего изучения кристаллов CdZnTe, легированных ионами подгруппы железа.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН. Работа Р.Б. Моргунова выполнена при поддержке Института проблем химической физики (в рамках тематической карты АААА-А19-119111390022-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Owens A., Peacock A. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2004. V. 531. P. 18. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.05.071>
- Takeda S. Experimental study of a Si/CdTe semiconductor Compton camera for the next generation of gamma-ray astronomy / Ph. D. Thesis. University of Tokyo. 2009.
- Hubbell J.H., Seltzer S.M. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest // National Institute of Standards and Technology. 2004. NISTIR 5632. <https://doi.org/10.18434/T4D01F>
- Del Sordo S., Abbene L., Caroli E. et al. // Sensors. 2009. V. 9 № 5. P. 3491. <https://doi.org/10.3390/s90503491>
- Duarte D.D. Edge effects in a pixelated CdTe radiation detector / Ph. D. Thesis. University of Surrey. 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20470.86081>
- Chaouai Z., Daniel G., Martinez J.M. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2022. V. 1033. P. 166670. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166670>
- Clements N., Richtsmeier D., Hart A., Bazalova-Carter M. // J. Instrumentation. 2022. V. 17. P. 1004. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/01/P01004>
- Brombal L., Donato S., Brun F. et al. // J. Synchrotron Radiat. 2018. V. 25. P. 1068. <https://doi.org/10.1107/S1600577518006197>
- Chen Y., Wang X., Song Q. et al. // AIP Adv. 2018. V. 8. P. 105113. <https://doi.org/10.1063/1.5052027>
- Krucker S., Benz A.O., Hurfordal G.J. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2013. V. 732. P. 295. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.05.050>
- Krause L., Tolborg K., Gronbech T.B.E. et al. // J. Appl. Cryst. 2020. V. 53. P. 635. <https://doi.org/10.1107/S1600576720003775>
- Павлюк М.Д. Дис. “Детекторные кристаллы на основе CdTe и Cd_{1-x}Zn_xTe для прямого счета рентгеновских и гамма-квантов”... канд. физ.-мат. наук. М.: ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, 2020.
- Шалдин Ю.В., Вархульска И., Рабаданов М.Х., Комарь В.К. // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. С. 300.
- Raiss A.A., Sbai Y., Bahmad L., Benyoussef A. // J. Magn. Magn. Mater. 2015. V. 385. P. 295. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.02.077>
- Goumrhar F., Bahmad L., Mounkachi O., Benyoussef A. // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 428. P. 368. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.12.041>
- Chavan K.T., Chandra S., Kshirsagar A. // Mater. Today Commun. 2022. V. 30. P. 103104. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.103104>
- Allahgholi A., Becker J., Delfs A. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2019. V. 942. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.06.065>
- Zerrai A., Cherkaoui K., Marrakchi G. et al. // J. Cryst. Growth. 1999. V. 197. P. 646. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)00763-5](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00763-5)
- Marbeuf A., Druilhe R., Triboulet R., Patriarche G. // J. Cryst. Growth. 1992. V. 117. P. 10. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(92\)90707-P](https://doi.org/10.1016/0022-0248(92)90707-P)
- Аветисов И.Х. Дис. “Физико-химические основы технологии кристаллических халькогенидов кадмия и цинка с контролируемой стехиометрией” ... д-ра физ.-мат. наук. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2011.
- Косяченко А.А., Склярчук В.М., Склярчук О.В., Маслянчук О.Л. // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45. С. 1323.
- Prokesch M., Szeles C. // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. P. 014503. <https://doi.org/10.1063/1.2209192>
- Кондрик А.И. // Функциональная микроэлектроника. 2004. № 6. С. 17.
- Pavlyuk M.D., Subbotin I.A., Kanevsky V.M., Artemov V.V. // J. Cryst. Growth. 2017. V. 457. P. 112. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.06.046>
- Ivanov Yu.M. // J. Cryst. Growth. 1998. V. 194. P. 309. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)00620-4](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00620-4)
- Павлюк М.Д., Каневский В.М., Иванов Ю.М. // Журн. неорган. химии. 2013. Т. 58. С. 1082. <https://doi.org/10.7868/S0044457X13080187>
- Кондрик А.И., Ковтун Г.П. // Материалы электроники. 2019. № 4–5. С. 43. <https://doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.43>
- Ivanov Yu.M., Artemov V.V., Kanevsky V.M. et al. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2004. V. 27. P. 371. <https://doi.org/10.1051/epjap:2004086>
- Комарь В.К., Наливайко Д.П., Герасименко А.С. и др. // Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтр. исследования 2002. Т. 3. С. 94.