

УДК 541.123.3

## ТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$

© 2019 г. Г. И. Виноградова<sup>1</sup>, \*, Л. В. Анзина<sup>1</sup>, Т. К. Менщикова<sup>2</sup>, В. А. Федоров<sup>2</sup>, \*\*

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, ул. Вавилова, 38, Москва, 119991 Россия

<sup>2</sup>Институт общей и неорганической химии им. П.С. Курнакова Российской академии наук,  
Ленинский пр., 31, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: givin39@mail.ru

\*\*e-mail: fedorov@igic.rus.ru

Поступила в редакцию 01.11.2018 г.

После доработки 19.04.2019 г.

Принята к публикации 06.06.2019 г.

Показана возможность легирования монокристаллов (МК)  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  элементами III группы Ga, In, Al в процессе отжига. Установлена связь между условиями отжига, составом отжиговой смеси и свойствами МК. Определены составы отжиговых смесей, обеспечивающие возможность получения МК  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  со значительно возросшей температурой Кюри. Проведены многоэтапные отжики, осуществляемые последовательно на одних и тех же образцах, позволившие установить роль каждого из компонентов смесей.

**Ключевые слова:** ферромагнитный полупроводник  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ , шпинели, температура Кюри, магнитный момент, легирование, отжиг

**DOI:** 10.1134/S0002337X19110150

### ВВЕДЕНИЕ

Ферромагнитный полупроводник  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  с  $T_C$ , равной 130 К, является наиболее хорошо изученным представителем класса магнитных полупроводников со структурой нормальной шпинели с ярко выраженными полупроводниковыми свойствами. Одновременное наличие магнитной и электрической подсистем приводит к возникновению ряда специфических особенностей, включая новые магнетоэлектрические и магнитооптические явления. В [1] рассмотрено влияние термообработки на электрические и магнитные свойства пленок  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ . Различные способы легирования, изовалентные замещения, внедрения, а также отклонения от стехиометрии по всем трем компонентам в пределах области гомогенности [2] существенно влияют как на электрические, так и на магнитные характеристики исследуемого материала.

Как известно, характер и температуру магнитного упорядочения в халькогенидных шпинелях определяют сверхобменные взаимодействия, поэтому внесение примесных ионов может приводить к изменению магнитных характеристик кристалла вследствие локального искажения кристаллической решетки и изменения характера распределения электронной плотности.

Известно, что легирование монокристаллов (МК)  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  элементами третьей группы — Ga [3] и In [4] — приводит к понижению температуры Кюри, при этом сопротивление остается неизменно высоким. В кристаллах  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ , легированных Ga и обладающих *n*-типом проводимости, наблюдался ряд особенностей электрических и гальваномагнитных характеристик, возникающих только при дефиците селена Se. В МК, содержащих малые добавки Ga, наблюдался эффект фотоиндуцированной намагниченности в окрестности фазового перехода, что соответствует повышению температуры Кюри на  $\sim 1$  К [5] при концентрации фотовозбужденных (неравновесных) носителей порядка  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Следует отметить, что в нелегированных галлием МК  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  увеличение  $T_C$  как под действием света, так и при высокой концентрации носителей тока (дефицит Se) не зафиксировано.

В [6] была теоретически показана роль косвенного обмена через электроны вблизи дефекта, а также его влияние на магнитное упорядочение кристалла, приводящее к увеличению  $T_C$ . Поэтому возможность создания высокой концентрации равновесных носителей заряда и изучение их влияния на магнитный обмен в кристаллах  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ ,

легированных галлием, представляет большой интерес.

Обычно легирование галлием проводили в процессе синтеза МК, однако такие кристаллы, как правило, были мелкими, плохо ограненными, с раковинами и трещинами, и их качество снижалось по мере увеличения содержания Ga. Поэтому целесообразно легирование  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  галлием путем отжига в его парах или парах его соединений, позволяющее сохранить размеры, форму и качество кристаллов, характерные для чистого материала. Действительно, в результате отжига в присутствии смеси  $\text{Ga}_2\text{Se}_3 + \text{Ga}$  были получены МК  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ , легированные Ga, с резко возросшей температурой фазового перехода (из парамагнитного в ферромагнитное состояние): от 130 до 172 К [7]. Установлено, что увеличение  $T_C$  связано с ростом ферромагнитного обмена за счет значительного (на четыре–шесть порядков) роста электронной проводимости.

Цель настоящей работы – показать возможность и преимущества отжига как метода осуществления целенаправленного легирования, замещения и вариации стехиометрии. Особое внимание уделено легированию в отжиговых смесях сложного состава и изучению влияния отдельных компонентов смеси на свойства МК при последовательном отжиге.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования отбирали качественные МК  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  с естественной огранкой и размером ребра октаэдра 1.5–2 мм, выращенные методом спонтанной кристаллизации из раствора в расплаве по методике [8].

Легирование МК  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  проводилось путем отжига в присутствии смесей различного состава: *B* – галлий Ga, индий In, алюминий Al, а также  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{In}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{Se}_3$  ( $\text{A}_2\text{Se}_3$ ) и Se как индивидуально, так и в различных комбинациях.  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{In}_2\text{Se}_3$  и  $\text{Al}_2\text{Se}_3$  синтезировали из исходных элементов, при этом использовали Ga, In и Al особой чистоты 5N и селен квалификации “с. в. ч.”

МК  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  и порошок данной шпинели (для уменьшения испарения летучих компонентов из основного МК), а также компоненты отжиговой смеси загружали в отдельные лодочки из плавящего кварца (рис. 1) и помещали в кварцевую ампулу, откачиваемую до давления  $5 \times 10^{-3}$  Па. Навеска МК составляла 0.1–0.13 г. Отжиг проводили в горизонтальной печи с последующим быстрым охлаждением на воздухе. Температура и длительность процесса обеспечивали достаточную скорость диффузии примесей в МК, необходимое давление паров компонентов легирующей шихты и отсутствие признаков термического разложения основного материала. При этом происходило

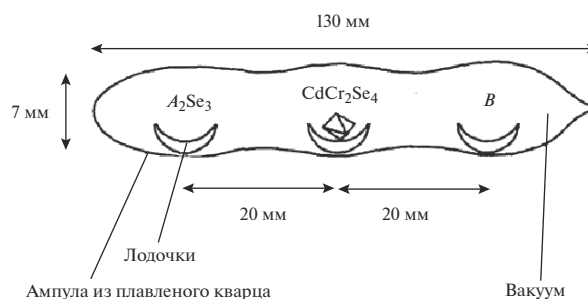


Рис. 1. Схема отжига МК  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ .

значительное изменение свойств МК после отжига с  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$  и с  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , зависящее от количественного соотношения масс кристаллов и легирующих добавок. После отжига поверхность кристаллов, свойства которой могли существенно отличаться от объемных, подвергалась механической шлифовке и полировке или травлению (три части  $\text{HCl}$  и одна часть  $\text{HNO}_3$ ).

МК исследовались методом рентгеновской дифракции на различных этапах обработки. Количество примесей Ga и In в МК, прошедших термическую обработку, определялось на лазерном масс-спектрометре ЭМАЛ-2, на атомно-абсорбционном спектрометре, а также методами химического анализа. Химический состав определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрофотометре фирмы Perkin–Elmer модели 303, в пламени ацетилен + воздух. Точность определения элементов (относительное стандартное отклонение) составляла для кадмия 0.006, хрома – 0.004, селена – 0.007.

Измеряли электрическое сопротивление исходных и отожженных образцов и его температурный ход от комнатной до азотной температуры и определяли тип проводимости по знаку эффекта Зеебека.

Температуру Кюри МК определяли высокочастотным методом в слабых магнитных полях по изменению магнитной проницаемости  $\mu(T)$  образца в области фазового перехода [9]. МК, находящийся внутри катушки индуктивности, помещали в прокачанную азотный криостат, температура внутри которого менялась в диапазоне 77–300 К. Вид температурной зависимости частоты автогенератора в области фазового перехода (ферромагнетик–парамагнетик) позволял судить о степени однородности магнитных свойств в объеме образца. Абсолютная точность измерения  $T_C$  1–2 К, разрешение по температуре и воспроизводимость 0.3 К. Таким образом, можно сравнивать  $T_C$  двух образцов с точностью 0.5 К. Скорость разгерметизации температуры выбиралась так, чтобы температурный градиент между образцом и термопарой не превышал 0.2 К. Температура определялась тер-

**Таблица 1.** Результаты поэтапного отжига МК CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> в различных смесях

Нелегированные МК CdCr <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> (масса, г)	0.1207	0.1121	0.1143
$R$ , Ом	$10^6 (R_{300}) \rightarrow 10^8 (R_{77})$		
$T_C$ , К	130		
<b>I этап – отжиг с Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub></b>			
Ga <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> (масса, г)	0.010	0.020	0.030
$R$ , Ом	$10^3 (R_{300}) \rightarrow 10^5 (R_{77})$		
$T_C$ , К	120	110	100
<b>II этап – отжиг с Ga</b>			
Ga (масса, г)	0.001	0.001	0.001
$R$ , Ом	$0.1 (R_{300}) \rightarrow 0.1 (R_{77})$		
$T_C$ , К	153	165	172
<b>III этап – отжиг с Se</b>			
Se (масса, г)	0.015	0.004	0.01
$R$ , Ом	$10^7 (R_{300}) \rightarrow 10^9 (R_{77})$		
$T_C$ , К	100	90	100

мопарой (Fe/FeAu) (Cu/CuFe), установленной вблизи кристалла.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для легирования галлием МК CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> была использована смесь сложного состава Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> + Ga, как и в случае легирования в процессе роста. Оказалось, что МК, прошедшие отжиг, характеризуются резким ростом температуры фазового перехода  $T_C$  (из парамагнитного в ферромагнитное состояние) от 130 до 172 К и увеличением (на четыре–шесть порядков) электронной проводимости. При этом полупроводник становится вырожденным. Таким образом, для магнитного полупроводника CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> был обнаружен принципиально новый эффект, заключающийся в усилении ферромагнитного обмена, связанного с включением косвенного обмена через электроны проводимости. Данный результат оказалось возможным получить только в случае проведения легирования галлием в процессе отжига. Так, в целях понимания роли каждого из компонентов отжиго-

вой смеси нами был проведен отжиг МК CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> в три этапа (табл. 1).

Для удобства сравнения величины навесок даны в расчете на 0.12 г чистого МК.

Из табл. 1 видно, что на первом этапе МК CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> отжигались только в присутствии Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> и что МК, прошедшие отжиг, остаются высокоомными, а их  $T_C$  падает с ростом количества Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> в шихте в соответствии с увеличением содержания Ga в МК. Этот эффект был ранее установлен для МК, легированных в процессе роста [7].

На втором этапе те же самые кристаллы, первоначально легированные Ga, в процессе отжига с Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> (I этап) и обладающие пониженной  $T_C < 130$  К, подвергались отжигу в присутствии металлического Ga (II этап). В результате были получены МК CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> с высокой  $T_C$  и резко возросшей проводимостью  $n$ -типа, при этом полупроводник становился вырожденным. Отметим, что чем ниже температура Кюри повторно отжигаемых в присутствии металлического галлия Ga кристаллов, тем выше  $T_C$  у МК, полученных на заключительном этапе. Самой низкой  $T_C = 100$  К на I этапе соответствует самая высокая  $T_C = 172$  К на II этапе. Следовательно, возникающее усиление ферромагнитного обмена за счет электронов проводимости не только обеспечивает рост  $T_C$  от 130 К (нелегированный кристалл), но также компенсирует ранее полученное уменьшение  $T_C$  (I этап). Становится ясно, что необходимым условием роста  $T_C$  МК является наличие в отжиговой смеси металлического Ga (II этап, табл. 1). Дальнейшее увеличение количества исходного Ga при отжиге не приводит к росту  $T_C$ . Наименьший рост  $T_C$  (142 К) (образец 4, табл. 2) дает отжиг МК в парах металлического Ga, хотя при этом проводимость достигает той же величины, что и в МК с  $T_C = 172$  К.

Такой отжиг дал возможность не только получать кристаллы, легированные Ga, со свойствами, аналогичными свойствам кристаллов, легированных в процессе роста, но и реализовать эффект усиления ферромагнитного обмена за счет взаимодействия равновесных носителей заряда с локализованными спинами магнитных ионов хрома, приводящий к росту  $T_C$ .

Эти результаты дают основание предположить, что для получения МК CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> с высокой проводимостью  $n$ -типа могут быть использованы другие элементы III группы Таблицы Менделеева, такие как In и Al. Основные результаты отжига МК CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> с In, Ga, Al, Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> и отжиговыми смесями, состоящими из различных их комбинаций, представлены в табл. 2.

Наличие примеси Ga и In в МК, прошедших термическую обработку, определялось на лазерном масс-спектрометре, на атомно-абсорбцион-

**Таблица 2.** Параметры МК, прошедших отжиг, и составы отжиговой шихты

Образец	CdCr <sub>2</sub> Se <sub>4</sub>	Ga	Ga <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	T <sub>C</sub>	R <sub>300</sub> , Ом	R <sub>77</sub> , Ом	Тип проводимости
1	Нелегированный МК	—	—	128.5	10 <sup>8</sup>	>10 <sup>9</sup>	<i>p</i>
2	0.1020	—	0.02	100	10 <sup>6</sup>	10 <sup>8</sup>	<i>n</i>
3	0.1086	0.001	0.02	172	~10 <sup>-1</sup>	~10 <sup>-1</sup>	<i>n</i>
4	0.1034	0.001	—	142	~10 <sup>1</sup>	~10 <sup>1</sup>	<i>n</i>
		In	In <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>				
5	0.1164		0.01	113.5	2 × 10 <sup>3</sup>	5 × 10 <sup>4</sup>	<i>p</i>
6	0.1128	0.001	0.01	115	~10 <sup>2</sup>	~4 × 10 <sup>4</sup>	<i>n</i>
7	0.1158	0.001	—	125	~10 <sup>1</sup>	~10 <sup>1</sup>	<i>n</i>
		In	Ga <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>				
8	0.1227	0.002	0.02	165	~10 <sup>0</sup>	~10 <sup>0</sup>	<i>n</i>
		Al	Ga <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>				
9	0.1308	0.003		75	~5 × 10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup> –10 <sup>3</sup>	<i>n</i>
10	0.1354	0.005	0.02	172	~10 <sup>1</sup>	~5 × 10 <sup>1</sup>	<i>n</i>
		Cd	Ga <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>				
11	0.1314	0.002	0.02	163	~10 <sup>0</sup>	~10 <sup>0</sup>	<i>n</i>
12	0.1685	0.003	—	128	~10 <sup>0</sup> –10 <sup>1</sup>	~10 <sup>0</sup> –10 <sup>1</sup>	<i>n</i>

Примечание. Все образцы отжигались при температуре 700°C в течение 7–14 суток; указаны массы компонентов смесей в граммах.

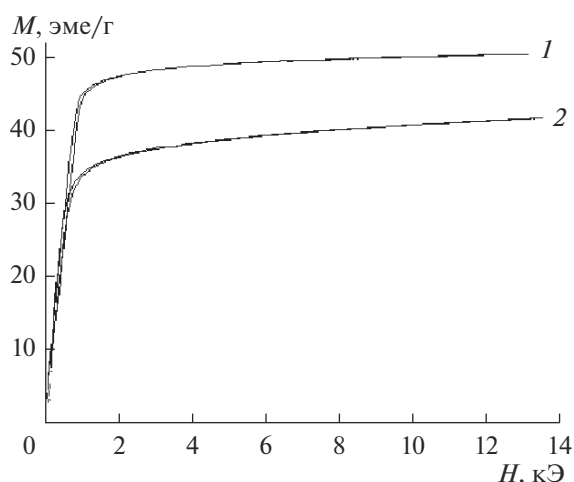
ном спектрометре, а также методами химического анализа. Было установлено, что концентрация галлия в кристаллах, отожженных в присутствии Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, менялась от тысячных процентов до 1–2% в зависимости от количества Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> в шихте. Методом рентгеновской дифракции было показано, что МК, прошедшие все виды отжига, сохраняют структуру нормальной шпинели.

**Таблица 3.** Характеристика основных и легирующих элементов, входящих в состав шпинели CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> (AB<sub>2</sub>X<sub>4</sub>)

Позиция	Ион	Степень окисления	Ионный радиус, Å
A	Cd	2+	0.99
	Ga	3+	0.62
	In	3+	0.92
	Al	3+	0.57
B	Cr	3+	0.64
X	Se	2–	1.93

Из анализа результатов, представленных в табл. 2, видно, что при отжиге МК с In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, In + In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> а также In и Al наблюдается только падение T<sub>C</sub>. Однако присутствие In и Al, как и Ga, приводит к значительному росту проводимости *n*-типа. Поэтому для этих двух образцов был проведен повторный отжиг с Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, что привело к резкому росту T<sub>C</sub>, как и в случае отжига нелегированных МК CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> в присутствии отжиговых смесей комбинированных составов: Ga + Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, In + Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, Al + Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> (образцы 3, 8, 10 из табл. 2). Описанные факты указывает на особую роль ионов Ga в наблюдаемом усилении ферромагнитного обмена через электроны проводимости. Наиболее вероятно изовалентное замещение ионов Cr<sup>3+</sup> ионами Ga<sup>3+</sup>, т. к. их ионные радиусы близки (табл. 3).

Замещение ионов Cr<sup>3+</sup> ионами Ga<sup>3+</sup> в октаэдрических позициях должно приводить к разбавлению магнитной подрешетки исходного монокристалла, ослаблению обменного взаимодействия и, как следствие, к понижению температуры Кюри и магнитного момента, что и установлено экспериментально (рис. 2).



**Рис. 2.** Кривые зависимости намагниченности  $M(H)$ : 1 – исходный образец  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  ( $T_C = 129$  К), 2 – образцы после отжига с  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$  ( $T_C = 110$  К).

При изовалентном замещении должно сохраняться неизменным сопротивление, характерное для нелегированного МК, что и наблюдается экспериментально в случае отжига в присутствии  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$ . По-видимому, ионы  $\text{Ga}^{3+}$  на месте иона  $\text{Cr}^{3+}$  и являются теми дефектами, вблизи которых возникает эффективный косвенный обмен через электроны проводимости, приводящий к росту  $T_C$ , что теоретически было предсказано Э.Л. Нагаевым. Остается открытым вопрос об источнике возникновения электронов, которые обеспечивают усиление ферромагнитного обмена.

Как показывает опыт, отжиг в присутствии металлических In, Ga, Al способствует резкому росту проводимости  $n$ -типа, что можно объяснить замещением ионов  $\text{Cd}^{2+}$  в тетраэдрических позициях ионами  $\text{In}^{3+}$ ,  $\text{Ga}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , которые при этом являются донорами. С другой стороны, отжиг в парах металлического кадмия приводит к незначительному, не превышающему 2 К, падению  $T_C$  и появлению высокой концентрации носителей  $n$ -типа, связанной с дефицитом Se. При этом на стенках ампулы и на поверхности образцов образуется серый налет  $\text{CdSe}$ . Повторный отжиг этих МК в присутствии  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$  позволяет получить  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  со значительно возросшей  $T_C = 165$  К (табл. 2).

Отметим, что отжиг в присутствии металлических In, Ga, Al, вероятно, тоже может привести к образованию селенидов и, тем самым, к дефициту Se. Образование селенидов подтверждено экспериментально. Возможно, образование дефицита Se, возникающего в процессе отжига МК  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  в парах металлов, является причи-

ной резкого роста (на несколько порядков) концентрации электронов.

Действительно, отжиг МК с повышенной  $T_C = 172$  К в парах Se (табл. 1, этап III) подтвердил эти предположения. Сопротивление МК резко возросло и достигло величины, характерной для МК, прошедших отжиг с  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$ , а  $T_C$  стремительно упала до 100 К ( $T_{C\text{max}} = 172$  К). Аналогичный отжиг в парах Se был проведен для всех МК с высокой  $T_C$ . Полученные результаты были подобны указанным выше. Основываясь на этом, можно сделать вывод, что основным источником высокой концентрации носителей заряда  $n$ -типа является дефицит Se, возникающий в процессе отжига МК в присутствии Al, In, Ga и Cd.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отжиг оказался единственным возможным способом реализовать в магнитном полупроводнике  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  косвенный обмен, который осуществляется вблизи дефектов в спиновой подрешетке через равновесные электроны проводимости, что и приводит к усилению ферромагнитного обмена и, как следствие, к росту  $T_C$ .

Установлено, что максимальный рост  $T_C$  вплоть до 172 К наблюдался при отжиге нелегированных МК  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  лишь в присутствии отжиговых смесей следующих комбинированных составов: Ga +  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$ , Al +  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$ , In +  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$ . Проведение поэтапного отжига МК для всех составов позволило определить роль каждого из компонентов отжиговых смесей: при отжиге с  $\text{Ga}_2\text{Se}_3$  ионы  $\text{Ga}^{3+}$  замещают ионы  $\text{Cr}^{3+}$  и являются дефектами в спиновой решетке, а при отжиге с Ga, Al, In, Cd образуются равновесные носители тока, ответственные за усиление ферромагнитного обмена.

Этот метод обладает рядом преимуществ: позволяет работать с малым количеством образцов, сокращает время получения образцов с заданными свойствами, а также дает возможность проведения последовательных отжигов одного и того же кристалла в разных условиях с целью выяснения причин изменения свойств данного материала.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа в части синтеза шпинели выполнена в рамках Госзадания ИОНХ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чжан А.В. Процессы перемагничивания и доменная структура ферромагнетиков. Красноярск, 2017. С. 29–55.

2. Бельский Н.К., Очертянова Л.И., Жегалина В.А., Калинин В.Т. Область гомогенности ферромагнитного полупроводника  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1984. Т. 21. № 5. С. 762–764.
3. Минаков А.А., Виноградова Г.И., Голант К.М., Веселого В.Г. Влияние легирования на обменные взаимодействия в магнитном полупроводнике  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  // ФТТ. 1977. Т. 19. № 7. С. 2075–2077.
4. Бельский Н.К., Очертянова Л.И., Жегалина В.А. Легирование индием и серебром монокристаллов тетраселенида дихрома-кадмия методом отжига // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1988. Т. 24. № 10. С. 1734–1736.
5. Веселого В.Г., Виноградова Г.И., Рудов С.Г. и др. Фотоиндуцированный рост намагниченности вблизи фазового перехода в ферромагнитных полупроводниках  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  и  $\text{HgCr}_2\text{Se}_4$  // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. С. 559–565.
6. Нагаев Э.Л., Подельщиков А.И. Фотоиндуцированные фазовые переходы в магнетиках // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. № 4. С. 1360–1372.
7. Тархов Д.А., Виноградова Г.И., Веселого В.Г., Менищикова Т.К., Губская Г.Ф. Повышение температуры Кюри  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  при легировании галлием // Неорганические материалы. 1994. Т. 30. № 4. С. 484–488.
8. Менищикова Т.К., Бельский Н.К., Валиханова Н.Х., Виноградова Г.И., Гаврилова М.М., Губская Г.Ф., Жуков Э.Г., Веселого В.Г., Федоров В.А. Чистота исходных веществ и фотоферромагнитный эффект в тетраселениде дихрома-кадмия // Высокочистые вещества. 1991. № 6. С. 36–41.
9. Голант К.М., Махотки В.Е., Веселого В.Г. Определение точки Кюри ферромагнетиков по температурной зависимости динамической магнитной проницаемости // ФТТ. 1975. Т. 17. № 8. С. 2279–2281.