

Челябинский государственный университет  
Лаборатория физики низких температур и магнетизма  
института физики им. Х. И. Амирханова ДФИЦ РАН  
Институт радиотехники и электроники  
им В. А. Котельникова РАН

# **ДНИ КАЛОРИКИ В ЧЕЛЯБИНСКЕ: функциональные материалы и их приложения**

**Сборник тезисов**

**16–20 августа 2021 г.  
Челябинск, Россия**

Челябинск  
Издательство Челябинского государственного университета  
2021

УДК 620  
ББК ЖЗ  
Д548

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Челябинского государственного университета

**Организационный и программный комитет**

*Сопредседатели*

С. В. Таскаев, Челябинск, Россия  
А. М. Алиев, Махачкала, Россия  
В. Г. Шавров, Москва, Россия

*Секретарь*

М. А. Загребин, Челябинск, Россия

И. В. Бычков, Челябинск, Россия  
В. Д. Бучельников, Челябинск, Россия  
В. В. Коледов, Москва, Россия  
В. В. Ховайло, Москва, Россия  
В. В. Соколовский, Челябинск, Россия  
А. Г. Гамзатов, Махачкала, Россия  
А. А. Амиров, Махачкала, Россия

Д548 **Дни калорики в Челябинске: функциональные материалы и их приложения** : сб. тез. (16–20 августа 2021 г., Челябинск, Россия). Челябинск : Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2021. 67 с.

ISBN 978-5-7271-1746-0

Тезисы охватывают исследования мультикалорических материалов и их приложения и включают направления, связанные с экспериментальным исследованием новых функциональных материалов с гигантскими калорическими и связанными с ними эффектами, а также с теоретическими исследованиями и численным моделированием перспективных мультикалорических и мультифункциональных материалов.

Результаты, представленные в сборнике, могут быть использованы в системе обучения и переподготовки кадров. Адресовано научным работникам, аспирантам и студентам физических и математических факультетов.

УДК 620(082)  
ББК ЖЗя431

ISBN 978-5-7271-1746-0

© Челябинский государственный университет, 2021



от друга. Поэтому необходимо исследовать влияние циклического магнитного поля на магнитокалорический эффект материалов, а именно, на величину эффекта, на его зависимость от частоты магнитного поля и на устойчивость магнитокалорических свойств при долговременном воздействии магнитного поля.

В работе будут представлены результаты изучения МКЭ ряда сплавов La-Fe-Co-Si в постоянных и переменных магнитных полях. Также будут изложены исследования зависимости МКЭ от химического состава.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-58-54006.*

[1] Khovaylo V. V. et. al. Phys. Rev. B., **78**, 060403 (2008).

[2] Gottschall T. et. al. Phys. Rev. B., **93**, 184431 (2016).

## **Магнитокалорический эффект в циклических магнитных полях: основные особенности**

А. М. Алиев, А. Г. Гамзатов, А. А. Амиров

Институт физики им. Х. И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия  
*lowtemp@mail.ru*

Исследование магнитокалорического эффекта в циклических магнитных полях имеет фундаментальный и прикладной интерес. С фундаментальной точки зрения, для изучения основных особенностей магнитных свойств посредством магнитокалорического эффекта требуется существенно повысить точность и чувствительность измерений. Этого можно добиться использованием синхронного детектирования сигнала, т. е. измеряя магнитокалорический эффект в переменных магнитных полях. С другой сто-



# Multicaloric studies in Fe<sub>49</sub>Rh<sub>51</sub> alloy: effect of magnetic field and hydrostatic pressure

A. A. Amirov<sup>1,2</sup>, A. P. Kamantsev<sup>3</sup>, V. D. Zaporozhets<sup>4</sup>, I. F. Gribov<sup>4</sup>,  
A. V. Golovchan<sup>4</sup>, V. I. Valkov<sup>4</sup>, A. M. Aliev<sup>1,2</sup>, V. V. Koledov<sup>3</sup>, V. G. Shavrov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

*amiroff\_a@mail.ru*

<sup>2</sup> Amirkhanov Institute of Physics, Daghestan Federal Research Center  
of Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia

<sup>3</sup> Kotelnikov IRE RAS, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Galkin DonIPE, Donetsk, DPR

Recent prospectives in the studies of functional materials with giant caloric effects for energy-efficient technologies are related to an idea based on the combination of external field (magnetic, electric, elastic) stimuli known as multicaloric effect [1; 2]. It is well known, that mechanical force be applied as one of the driving forces for tuning of transition temperature and hysteresis in materials with first-order magnetic phase transition (FOMPT) [2]. From this point of view, a model object is the equi-atomic ordered phase of FeRh that exhibits a FOMT from the low temperature antiferromagnetic (AFM) to the high-temperature ferromagnetic (FM) phase, accompanied by resistivity, entropy and lattice changes.

Fe<sub>49</sub>Rh<sub>51</sub> alloy were fabricated using induction method, structurally characterized and its magnetic properties were studied under hydrostatical pressure. The H-P-T phase diagram for Fe<sub>49</sub>Rh<sub>51</sub> at range of applied pressure (0–12 kbar) and magnetic field (0–1 T) were plotted and it was shown that the magnetic field shifts the AFM-FM transition to the high temperature region, and the pressure — to the low temperature region. Using results of magnetic measurements, indirect magnetocaloric effect under pressure were studied. It was shown that hydrostatical pressure could be used for tuning of maximum magnetic entropy change.

[1] Stern-Taulats E., Castán T., Mañosa L., Planes A., Mathur N. D., Moya X. *MRS Bulletin* **43**, 295 (2018).

[2] Manosa L., Gonzalez-Alonso D., Planes A., Bonnot E., Barrio M., Tamarit J. L., Aksoy S., Acet M. *Nature Materials* **9**, 478 (2010).

# Магнитные свойства полуметаллического сплава $Mn_2VGe$

Д. Р. Байгутлин<sup>1</sup>, В. В. Соколовский<sup>1,2</sup>, О. Н. Мирошкина<sup>1,3</sup>,  
В. Д. Бучельников<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС», Москва, Россия

<sup>3</sup> Университет Дуйсбурга — Эссена, Дуйсбург, Германия  
*d0nik1996@mail.ru*

Новые мультифункциональные материалы, сочетающие в себе несколько свойств, представляют интерес для физики конденсированного состояния и являются определяющими для создания современных технологий. Сплавы Гейслера представляют собой один из самых интересных классов мультифункциональных материалов благодаря широкому классу наблюдаемых в них явлений, таких как гигантское магнитосопротивление [1], память формы [1], полуметаллические свойства [2], большой магнитокалорический эффект (МКЭ) [3] и др.

Большое разнообразие свойств наблюдается в полуметаллических сплавах Гейслера  $Mn_2YZ$ . Это возникает из-за присутствия в данных сплавах Mn, который обладает сложной магнитной структурой и благодаря этому имеет множество энергетических минимумов. Типичными примерами являются  $Mn_2VAl$ ,  $Mn_2VSi$ ,  $Mn_2FeZ$  ( $Z = Al, Sb$ ),  $Mn_2CoZ$  ( $Z = Al, Ga, Si, Sb$ ),  $Mn_2CuSb$ ,  $Mn_2ZrSi$ , некоторые из которых синтезированы экспериментально [4]. Целью данной работы является исследование магнитных свойств полуметаллического сплава Гейслера  $Mn_2VGe$ .

Геометрическая оптимизация проведена в рамках теории функционала плотности и подхода присоединённых плоских волн, реализованного в программном пакете VASP. Обменно-корреляционные эффекты аппроксимируются функционалами GGA-PBE [5] и meta-GGA SCAN [6].

Геометрическая оптимизация проводилась для решёток типа  $L2_1$

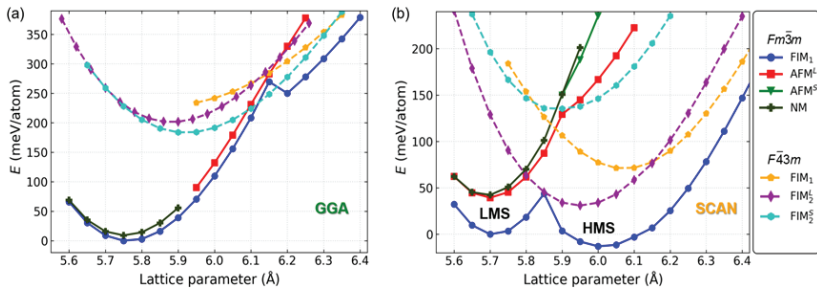


Рис. 1. Полная энергия ( $E$ )  $Mn_2VGe$  как функция параметра решетки

и  $X_A$ , имеющих ферромагнитное (FM), ферримагнитное (FIM) или антиферромагнитное упорядочение (AFM). Результаты релаксации для PBE и SCAN представлены на рис. 1(a) и (b) соответственно. Энергетически выгодной для обоих функционалов является решётка типа  $L2_1$  с ферримагнитным упорядочением. Важной особенностью является наличие минимума с маленьким магнитным моментом (LMS) и большим магнитным моментом (HMS), которые практически вырождены.

На рис. 2 представлена зависимость полного магнитного момента и магнитных моментов атомов Mn и V от параметра решётки. Магнитный момент для LMS фазы составляет  $\mu_{tot} = 1,0 \mu_B/\text{ф.е}$  и подчиняется правилу Слейтера — Поллинга, магнитный момент фазы HMS равен  $\mu_{tot} = 4,48 \mu_B/\text{ф.е}$ .

Таким образом, методами теории функционала плотности исследованы магнитные свойства сплава  $Mn_2VGe$ . Показано, что при учёте сильных корреляций в сплаве наблюдается два состояния,

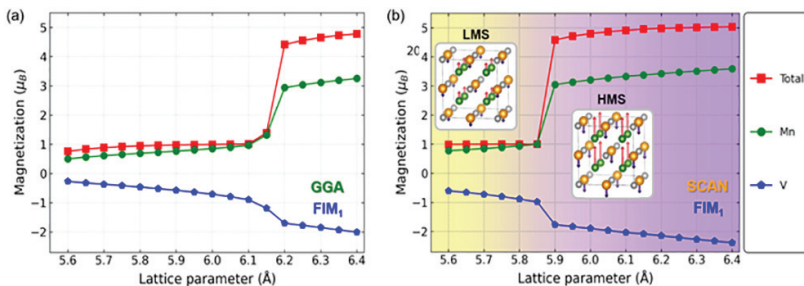


Рис. 2. Полный и поэлементные магнитные моменты  $Mn_2VGe$  как функция параметра решётки для функционалов GGA и SCAN



при переходе между которыми изменение магнитного момента составляет  $\sim 3,5 \mu_B/\text{ф.е.}$

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Челябинской области в рамках научного проекта № 20-42-740006\20.*

- [1] Wuttig M. et al. J. Appl. Phys., **87(9)**, 4707 (2000).
- [2] Felser C. et al. Angew. Chem. Int. Ed., **46(5)**, 668 (2007).
- [3] Khovaylo V. V. et al. Phys. Status Solidi B., **251 (10)**, 2104 (2014).
- [4] Xin Y. et al. Intermetallics, **80**, 10 (2017).
- [5] Perdew J. et al. Phys. Rev. Lett., **77**, 3865 (1996).
- [6] Sun J. et al. Phys. Rev. Lett., **115**, 036402 (2015).

## Теоретические подходы к описанию магнитокалорического эффекта в магнитоупорядоченных веществах

В. Д. Бучельников, В. В. Соколовский

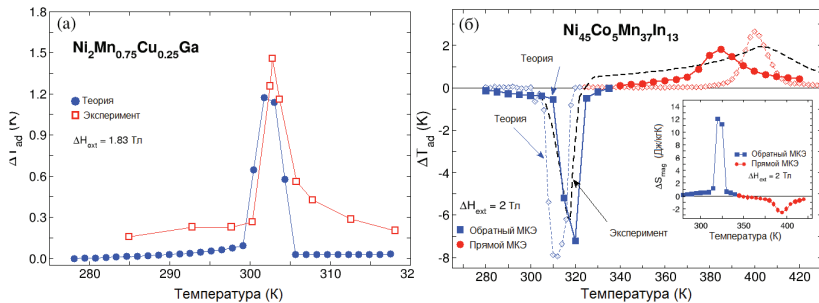
Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия  
*buche@csu.ru*

В последние годы активно ведутся поиски новых магнитоупорядоченных веществ на наличие максимального магнитокалорического эффекта (МКЭ), заключающегося в изменениях температуры (в адиабатических условиях) и энтропии (в изотермических условиях) при изменении магнитного поля. Интенсивные исследования позволили выявить широкий ряд различных сплавов, зарекомендовавших себя как перспективные магнитокалорические материалы. К таким сплавам можно отнести Fe-Rh,  $\text{Mn}_3\text{GaC}$ ,  $RM_2$  (где  $R$  — редкоземельный элемент,  $M = \text{Al, Co, Ni}$ ),  $\text{Gd}_5(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_4$ ,  $\text{Mn}(\text{As}_{1-x}\text{Sb}_x)$ ,  $\text{MnFe}(\text{P}_{1-x}\text{As}_x)$ ,  $\text{La}(\text{Fe}_{13-x}\text{Si}_x)$  и их гидраты,  $R_{1-x}M_x\text{MnO}_3$

(где  $R$  — лантаноид и  $M = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$ ), а также сплавы Гейслера  $\text{Ni}(Y)\text{-Mn-Z}$  ( $Y = \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Co}$  и  $Z = \text{Ga}, \text{In}, \text{Sn}$ ) [1].

В докладе будут рассмотрены теоретические подходы на макро- и микроскопическом уровне для описания магнитокалорических свойств ферромагнитных материалов. Макроскопический подход будет включать модели в рамках теорий фазовых переходов Ландау, размытых фазовых переходов Малыгина, Бина — Родбелла и молекулярного поля. Микроскопический подход будет включать спин-решётчные гамильтонианы Гейзенберга, Поттса, Блюмэ — Эмери — Гриффитса (БЭГ) совместно с методом Монте-Карло и теорией функционала плотности.

На рисунке приведены результаты моделирования прямого и обратного МКЭ в области магнитных и структурных фазовых переходов для сплавов Гейслера. Моделирование выполнено с помощью модели Поттса и БЭГ и метода Монте-Карло. В целом можно видеть хорошее согласие между теорией и экспериментом.



*Теоретические и экспериментальные зависимости адиабатического изменения температуры для сплавов Гейслера (а)  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Ga}$  [2] и (б)  $\text{Ni}_{45}\text{Co}_5\text{Mn}_{37}\text{In}_{13}$  [3]. Открытыми и закрашенными символами на рисунке (б) обозначены результаты для монокристаллической и поликристаллической модели*

*Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 17-72-20022.*

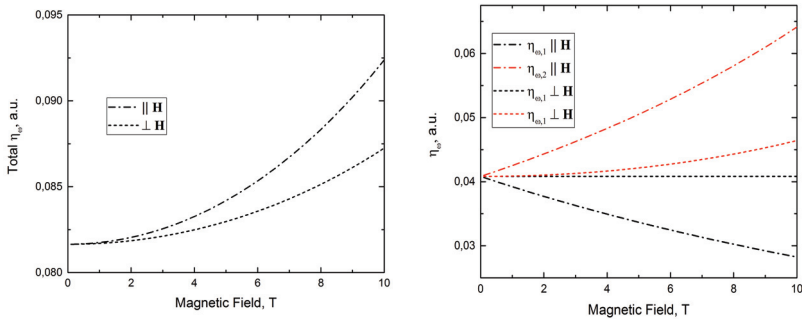
[1] Gschneidner K. A. Jr. et al. Reports on Progress in Physics, **68**, 1479 (2005).

[2] Sokolovskiy V. V. et al. J. Appl. Phys., **114**, 183913 (2013).

[3] Comtesse D. et al. Phys. Rev. B, **89**, 184403 (2014)



Для данного тензора магнитное поле направлено по оси  $z$ . В такой среде может распространяться два типа волн, поэтому ИС будет складываться из трёх слагаемых [3]  $\eta_\omega = \eta_{\omega,1} + \eta_{\omega,2} + \eta_{\omega,12}$ , где  $\eta_{\omega,i}$  — ИС на волнах типа  $i$ ,  $\eta_{\omega,12}$  — интерференционный член. Как было показано ранее [3], последнее слагаемое не играет существенной роли. Для определённости выберем диоксид ванадия  $\text{VO}_2$ , в котором при температурах, близких к комнатной, происходит фазовый переход металл–полупроводник. Для полупроводниковой фазы характерные параметры следующие:  $\omega_p \sim 10^{13}$  рад/с,  $\omega_H \sim 10^8$  Н рад/с. Основным вопросом в настоящей работе является изучение влияния внешнего магнитного поля на ИС анизотропной среды. Рассмотрим для определённости излучение ТГц диапазона частот ( $\omega = 5 \cdot 10^{13}$  рад/с). Результаты расчётов представлены на рисунке.



*Излучательная способность полупроводника в магнитном поле*

Можно отметить, что отличие в ИС для разных типов волн сильнее в направлении вдоль магнитного поля, поперёк магнитного поля ИС одной из волн не зависит от величины поля, в то время как для второй волны — незначительно растёт. Суммарная ИС для двух типов волн растёт с ростом магнитного поля, однако при разумных магнитных полях до 1 Т этот рост незначительный. Поляризационный состав излучения в магнитном поле будет существенно отличаться от поляризации излучения в отсутствие магнитного поля. Полученные результаты пробуждают интерес к дальнейшему исследованию данных эффектов в многослойных наноструктурах,

когда важную роль будут играть не только дальнеполевое излучение, но и ближнеполевые взаимодействия.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 20-37-70038, 19-07-00246, 20-47-740004), РНФ (грант № 20-19-00745).*

*Численные расчёты произведены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № 075-00992-21-00.*

[1] Рытов С. М. Успехи физических наук, **55**, 299 (1955).

[2] Рытов С. М. Успехи физических наук, **63**, 657 (1957).

[3] Бункин Ф. В. Журн. экспериментальной и теоретической физики, **32** (4), 811 (1957).

[4] Виноградов Е. А., И. А. Дорофеев. Термостимулированные электромагнитные поля твёрдых тел. М. : Физматлит, 2010. 484 с.

[5] Волокитин А. И., Перссон Б. Н. Дж. Успехи физических наук, **177**, 921 (2007).

## **Аномальная частотная зависимость магнитокалорического эффекта в $\text{Fe}_{50}\text{Rh}_{50}$ в магнитном поле 1,2 Тл**

А. Г. Гамзатов<sup>1</sup>, А. М. Алиев<sup>1</sup>, А. Б. Гаджиев<sup>1</sup>, К. Qiao<sup>2</sup>, F. Hu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Х. И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

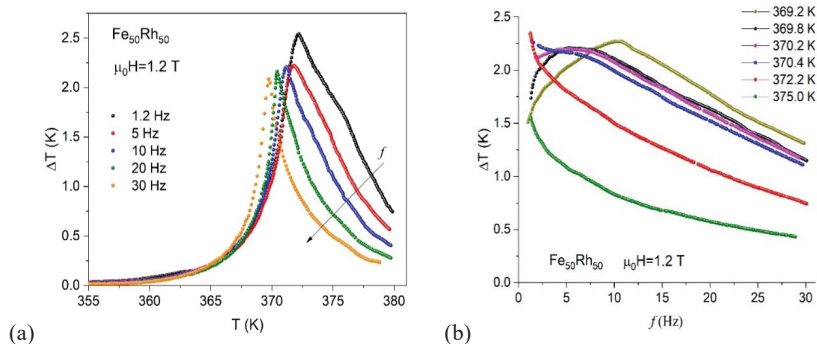
<sup>2</sup> Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P. R. China  
*gamzatov\_adler@mail.ru*

Несмотря на то, что процесс создания твердотельных магнитных холодильников переходит в практическую плоскость, технология магнитного охлаждения столкнулась с множеством проблем, требующих дальнейших исследований. Как известно, созданные

на сегодняшний день прототипы магнитных холодильных машин работают на относительно низких частотах 4–10 Гц. Однако на сегодняшний день практически отсутствуют результаты исследования МКЭ, как в зависимости от частоты магнитного поля, так и при условиях длительного воздействия циклического магнитного поля.

В данной работе приводятся результаты исследования частотной зависимости МКЭ и деградации магнитокалорических свойств для сплава  $\text{Fe}_{50}\text{Rh}_{50}$  в магнитном поле 1,2 Тл.

На рисунке приведены результаты исследования МКЭ при разных частотах. Как видно из рисунка (а), с ростом частоты магнитного поля наблюдается смещение максимума в сторону низких температур, при этом величина эффекта уменьшается незначительно. Вследствие этого явления мы наблюдаем (рисунок (б)), что ниже температуры максимума в узком интервале температур 369,2–370,2 К наблюдается аномальный рост величины МКЭ с ростом частоты магнитного поля (до 11 Гц).



Температурная зависимость МКЭ при разных частотах (а), частотная зависимость МКЭ при разных  $T$  в поле 1,2 Тл (б)

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Государственного фонда естественных наук Китая в рамках научного проекта № 21-58-53046.*

# Роль магнитного и температурного циклирования в образовании мартенсита и их влияние на магнитокалорический эффект на примере монокристалла сплава Гейслера Ni-Mn-Ga

Э. Т. Дильмиева<sup>1</sup>, Ю. С. Кошкидько<sup>1,2</sup>, В. В. Ховайло<sup>3</sup>, В. В. Коледов<sup>1</sup>,  
В. Г. Шавров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. А. В. Котельникова РАН,  
Москва, Россия  
*dilmieva@cplire.ru*

<sup>2</sup> Институт низких температур и структурных исследований им. Тшебя-  
товского ПАН, Вроцлав, Польша

<sup>3</sup> Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС», Москва, Россия

В последние годы изучению магнитокалорического эффекта (МКЭ) посвящено огромное количество работ. МКЭ изучают для широкого круга материалов [1], прямым [2] и косвенным методами [3], в средних [4; 5] и сильных магнитных полях [6]. Известно, что максимальные значения МКЭ наблюдаются вблизи магнитных фазовых переходов, особое внимание привлекают магнитоструктурные фазовые переходы. В области магнитоструктурного фазового перехода МКЭ имеет два основных вклада [7]. Это вклады от магнитной и структурной подсистем, которые могут иметь как положительные, так и отрицательные вклады в МКЭ и, соответственно, способны конкурировать между собой в зависимости от циклирования в магнитном поле. Предполагается, что МКЭ резко зависит от циклирования в магнитном поле из-за необратимости структурного превращения под воздействием даже сильных магнитных полей [8]. В свою очередь необратимость структурного превращения связана с наличием гистерезиса, характерного для фазовых переходов 1-го рода. В работе [9] особое внимание обращается на то, что решающий вклад в характерный гистерезис фазового перехода 1-го рода вносит зародышеобразование. Тема зародышеобразования

[8–10] и его влияния на МКЭ в сплавах Гейслера [11] обсуждается в современных работах крайне редко, поэтому авторы статьи предлагают изучение магнитоиндуцированного структурного перехода в сильных магнитных полях на специально разработанной оптической установке [12], уделяя внимание вопросу зародышеобразования при магнитоиндуцированном мартенситном превращении в сильных магнитных полях на примере монокристалла сплава Гейслера  $\text{Ni}_{2,19}\text{Mn}_{0,81}\text{Ga}$  и его влияния на МКЭ.

Таким образом, в настоящей работе с помощью разработанной оптической установки был изучен термоупругий мартенситный переход на монокристаллическом сплаве Гейслера  $\text{Ni}_{2,19}\text{Mn}_{0,81}\text{Ga}$  под действием сильных магнитных полей до 10 Тл в изотермических условиях. На основе оптических наблюдений микроструктуры построена магнитная ( $T-\mu_0H$ ) фазовая диаграмма для монокристаллического сплава Гейслера  $\text{Ni}_{2,19}\text{Mn}_{0,81}\text{Ga}$  до 10 Тл. Показано, что зависимость характерных температур фазового перехода 1-го рода от магнитного поля до 10 Тл имеет линейный вид с соответствующим коэффициентом наклона 0,5 К/Тл. Установлено, что отсутствие термоциклирования снижает величину магнитного поля, необходимую для зарождения мартенситной фазы, т. к. остаточная низкотемпературная фаза является дополнительным центром зарождения мартенсита. Основной причиной снижения величины МКЭ в области магнитоструктурного перехода при последовательном циклировании в магнитном поле является уменьшение скачка намагниченности, вызванного остаточным мартенситом, который образовался в результате первого намагничивания. Последующее включение магнитного поля вызывает увеличение объема остаточного мартенсита, т. е. с каждым последующим циклом переход из аустенита в мартенсит происходит всё в меньшем объеме [13].

*Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ  
№ МК-355.2020.2 и частично поддержана Российским фондом  
фундаментальных исследований № 20-58-54006.*

[1] Lyubina J. J. Phys. D: Appl. Phys., **50**, 053002 (2017).

[2] Ghorbani Zavareh M., Salazar Mej C. et.al. Appl. Phys. Lett., **106**, 071904 (2015).





- [3] Khovailo V. V., Oikawa K. et.al. J. Appl. Phys., **9**, 8483 (2003).  
[4] Taskaev S., Skokov K. et. al. J. Magn. Magn. Mater., **479**, 307 (2019).  
[5] Gamzatov A. G., Aliev A. M. et.al. Appl. Phys. Lett., **113**, 172406 (2018).  
[6] Koshkid'ko Y., Pandey S. et. al. J. Alloys Compd., **821**, 153402 (2020).  
[7] Gottschall T., Skokov K. P. et. al. Phys. Rev. B., **93**, 184431 (2016).  
[8] Kihara T., Katakura I. et. al. J. Alloys Compd., **577**, S722 (2013).  
[9] Schwabe S., Schleicher B. et. al. Energy Techn., **6**, 1453 (2018).  
[10] Grechishkin R. M., Gasanov O. V. et. al. IOP Conf. Series: Mater. Sci. Engin., **77**, 012045 (2015).  
[11] Gottschall T., Stern-Taulats E. et. al. Appl. Phys. Lett., **110**, 223904 (2017).  
[12] Dilmieva E. T., Koshkid'ko Y. S. et. al. Bulletin Russ. Acad. Sci.: Phys., **81**, 1283 (2017).  
[13] Dilmieva E. T., Koshkid'ko Y. S. et. al. J. Appl. Phys., **127**, 175103 (2020).

## Исследование из первых принципов модулированных структур сплавов Гейслера Ni-Mn-Sn, допированных Co

К. Р. Ерагер, В. В. Соколовский, В. Д. Бучельников

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия  
*eragerk@rambler.ru*

Всё большее внимание в последние годы привлекают сплавы с магнитной памятью формы, обладающие значительной магнитодеформацией, вызванной магнитным полем, а также с гигантским магнитокалорическим эффектом (МКЭ), которые используются в современных технологиях [1; 2]. Эффект памяти формы, индуцированный магнитным полем, возможен только в модулированных мартенситных структурах [3].

Одними из потенциальных магнитокалорических материалов являются сплавы Гейслера, среди которых система Ni-Mn-Sn привлекает большее внимание, поскольку эти сплавы обладают гигантским магнитокалорическим эффектом. Результаты недавних исследований [4] показали, что допирование Co может значительным образом повлиять на магнитные свойства сплавов Ni-Mn-Sn. Частичное замещение узлов Ni атомами Co приводит к увеличению изменения намагниченности при мартенситном переходе. Это изменение намагниченности значительно увеличивает МКЭ для данных сплавов. Результаты также показывают, что температура мартенситного перехода постепенно снижается, в то время как температура Кюри растёт с увеличением концентрации Co. Таким образом, допирование Co может значительно улучшить обменные взаимодействия в сплавах.

Нами рассматривалась модулированная пятислойная структура сплава Гейслера  $Ni_{1-x}Co_xMn_{1+x}Sn_{1-x}$  10M: (5M), состоящая из 80 атомов с ферро- и ферримагнитным упорядочением магнитных моментов. Исследования из первых принципов были выполнены с помощью программного пакета VASP [5; 6] в приближении GGA-PBE [7]. Геометрическая оптимизация рассчитывалась в рамках ионной релаксации. Интегрирование зоны Бриллюэна проводилось на сетке Монкхорста — Пака ( $12 \times 2 \times 10$ ).

Известно, что энергия модулированных структур по модулю значительно больше в сравнении с энергией фаз аустенита  $L2_1$ , а ферримагнитное упорядочение магнитных моментов в сплаве позволяет получить ещё более энергетически выгодную конфигурацию. Также предполагается, что увеличение количества чередующихся последовательно плоскостей по типу  $(3)_2$  для 10M и  $(5)_2$  для 14M позволит получить энергетически выгодные модулированные структуры, превышающие по модулю значения энергии немодулированного мартенсита.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № 075-00992-21-00.*





проявляющееся в том, что при приложении внешнего магнитного поля или механического напряжения в них наблюдаются высокие значения магнитострикции при низких значениях внешних воздействий, в частности, при низких магнитных полях. Оценка влияния небольшой добавки атомов Al в бинарные сплавы Fe-Ga [1; 2] показала, что величина тетрагональной магнитострикции тройных сплавов Fe-Ga-Al уменьшается незначительно, за счёт одновременного роста как величины магнитоупругой постоянной, так и модуля тетрагонального сдвига. Аналогичные данные для тройных сплавов Fe-Ge-Al отсутствуют. Таким образом, целью данной работы является исследование влияния небольшой добавки Al на магнитные свойства сплавов  $Fe_{100-x}Ge_x$ .

Исследования выполнены с помощью метода проекционных присоединённых волн (*Projector augmented wave — PAW*), реализованного в вычислительном пакете VASP (*Vienna Ab initio Simulation Package*) [3; 4]. Были рассмотрены две кристаллические структуры, наблюдаемые экспериментально в сплавах  $Fe_{100-x}(Ge, Al)_x$  ( $x \leq 25$  ат.%) :  $A2$  (группа симметрии  $Im-3m$ , #229) и  $D0_3$  (группа симметрии  $Fm-3m$ , #225). Для создания нестехиометрических композиций и структурного беспорядка использовался подход 32-атомной суперъчейки совместно со специальными квазислучайными структурами, созданными при помощи пакета ATAT (*Alloy Theoretic Automated Toolkit*) [5]. Учёт обменно-корреляционных эффектов проводился в приближении обобщённого градиента (*general gradient approximations*) в формулировке Пердью, Бурке и Эрнцернхофа (*Perdew, Burke, Ernzerhof*) [6].

В результате были получены зависимости равновесных параметров кристаллической решётки, модулей упругости, магнитных моментов, постоянной тетрагональной магнитострикции от содержания Al, а также зависимости энергии магнитокристаллической анизотропии от величины малой деформации для сплавов  $Fe_{100-x}(Ge_{x-y}Al_y)$ .

На рисунке представлены магнитные моменты (полный и частичный для Fe) кристаллических структур  $A2$  и  $D0_3$  в зависимости от содержания Al в сплавах  $Fe_{100-x}(Ge_{x-y}Al_y)$ . Из рисунка вид-





# Магнитокалорические и магнитотранспортные свойства ленточного образца сплава Гейслера



А. Г. Гамзатов<sup>1</sup>, А. М. Алиев<sup>1</sup>, Ш. К. Хизриев<sup>1</sup>, А. Т. Кадырбардеев<sup>1</sup>,  
А. Б. Батдалов<sup>1</sup>, А. Н. Ханов<sup>1</sup>, N. H. Yen<sup>2</sup>, N. H. Dan<sup>2</sup>, S.-C. Yu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики им. Х. И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

<sup>2</sup>Institute of Materials Science, VAST, 18-Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam

<sup>3</sup>School of Natural Science, Ulsan National Institute of Science and Technology,  
Ulsan 44919, South Korea

*anvar.kadirbardeev@gmail.com*

Сплавы Гейслера рассматриваются как перспективные функциональные материалы, на основе физических свойств которых могут быть созданы инновационные технологии, в частности, технология магнитного охлаждения, основанная на магнитокалорическом эффекте (МКЭ).

Очевидно, что эффективность работы холодильной машины, работающей на основе МКЭ, будет тем выше, чем выше частота термодинамических циклов намагничивания/размагничивания рабочего тела — частота переменного магнитного поля. Однако она не может быть бесконечно большой и ограничена кинетикой протекания фазовых превращений. Предельная частота термодинамического цикла имеет также технические ограничения, связанные с конечной скоростью отвода тепла от рабочего тела холодильного устройства. Последняя зависит как от теплопроводности самого тела, так и от его геометрической формы.

Наиболее эффективной формой в аспекте улучшения теплоотвода являются тонкие ленты, в которых отношение площади поверхности к объёму будет максимальным. Кроме того, исследования динамического отклика образцов магнитокалорических материалов в виде тонких лент на воздействия переменного магнитного поля будут способствовать лучшему пониманию взаи-



при разовом включении магнитного поля, тогда как на рисунке (а) при циклических магнитных полях с частотой 0,13 Гц.

Также по результатам исследования магнитотранспортных свойств в сплаве  $\text{Ni}_{45}\text{Co}_5\text{Mn}_{31}\text{Al}_{19}$  обнаружена прямая связь между изменением электросопротивления в магнитном поле вблизи МСФП и МКЭ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ВАНТ в рамках научного проекта № 20-58-54006.*

## Бесконтактное измерение магнитокалорического эффекта

А. П. Каманцев<sup>1</sup>, А. А. Амиров<sup>2,3</sup>, А. М. Алиев<sup>2</sup>, В. В. Коледов<sup>1</sup>,  
В. Г. Шавров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,  
Москва, Россия [kaman4@gmail.com](mailto:kaman4@gmail.com)

<sup>2</sup> Институт физики им. Х. И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

<sup>3</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия  
[amiroff\\_a@mail.ru](mailto:amiroff_a@mail.ru)

Прямые измерения адиабатического изменения температуры  $\Delta T$  твердотельных магнитных материалов во внешнем магнитном поле могут быть выполнены с использованием контактной или бесконтактной термометрии, с пространственным разрешением или без него.

Прямые измерения  $\Delta T$  считаются трудоёмкими из-за ряда причин. Во-первых, необходимо использование весьма больших образцов, чтобы избежать влияния используемого термодатчика; во-вторых, необходимо учитывать нежелательное влияние внешнего магнитного поля на термодатчики; в-третьих, потому, что







повышения скорости движения и снижения удельных энергозатрат [1]. Цель работы — экспериментальное исследование процесса магнитной левитации криостата с элементами из керамики высокотемпературного сверхпроводника Y-Ba-Cu-O на макете трассы из линеек постоянных магнитов на основе Nd-Fe-B.

Принцип работы магнитолевитационной транспортной системы основан на использовании явления магнитной левитации высокотемпературных сверхпроводников второго рода (рис. 1). Над трассой, собранной из постоянных магнитов, охлаждается криостат с высокотемпературным сверхпроводником (ВТСП) состава YBaCuO (рис. 2). Температура перехода ВТСП в сверхпроводящее состояние равна 93 К, что позволяет охлаждать криостат жидким азотом.

Полученные результаты (рис. 3) на используемой установке позволили добиться максимальной нагрузки в 60 кг вертикальной и 15 кг латеральной нагрузки, что открывает возможность перехода к следующему уровню масштабируемости проекта. Важное

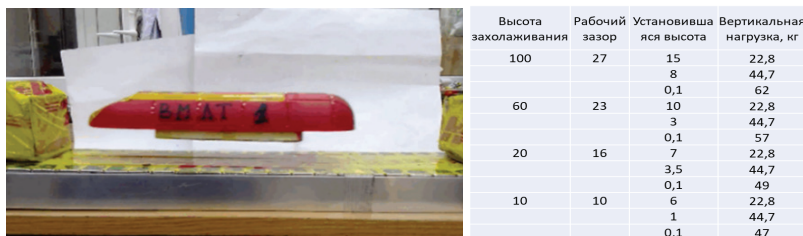


Рис. 1. Принцип магнитной левитации

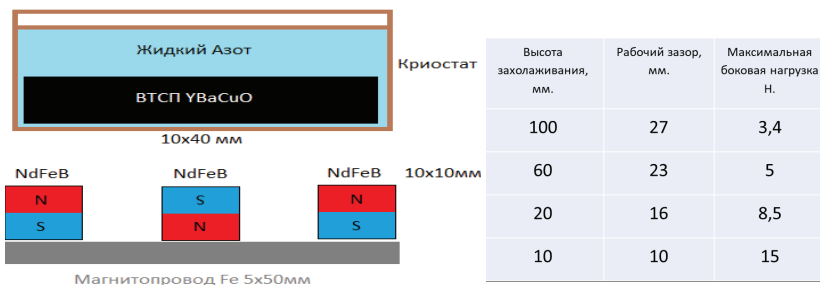


Рис. 2. Разрез трассы МЛТ

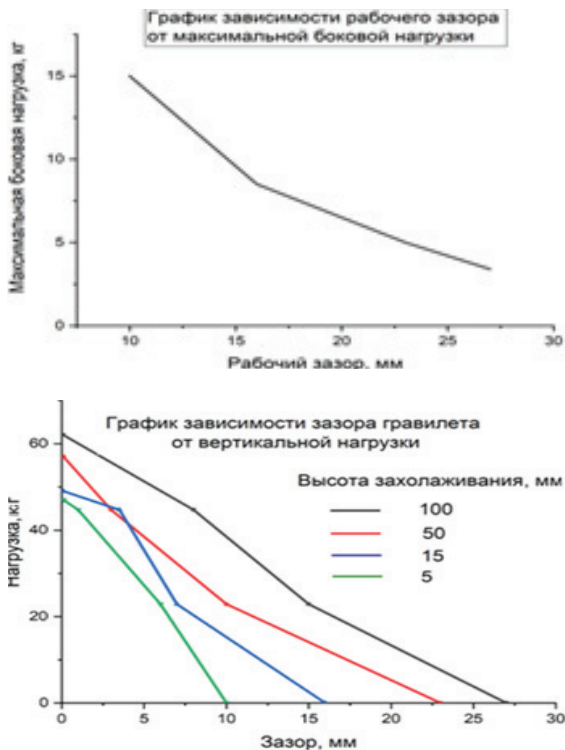


Рис. 3. Измерение силы левитации и боковой устойчивости

значение приобретает поиск методов точного определения сил сопротивления и разделение вкладов сил аэродинамического трения и специфических потерь в сверхпроводниках второго рода.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51005.*

[1] Терентьев Ю. А. и др. Транспортные системы и технологии, **5(4)**, 25 (2019).

# Поиск гигантского электрокалорического эффекта в пироэлектрическом соединении триглицинсульфат

В. В. Коледов<sup>1,2</sup>, В. Г. Шавров<sup>1,2</sup>, М. С. Быбик<sup>1</sup>, В. С. Калашников<sup>1</sup>,  
А. В. Несоленов<sup>1</sup>, Д. Д. Кузнецов<sup>1</sup>, С. В. Фонгратовски<sup>1,2</sup>,  
А. П. Каманцев<sup>1,2</sup>, Г. А. Шандрюк<sup>3</sup>, A. Peláiz-Barranco<sup>4</sup>

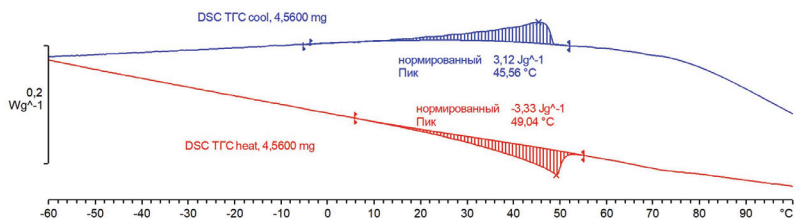
<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>НТУ «Сириус», Сочи, Россия

<sup>3</sup>Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва,  
Россия

<sup>4</sup><sup>29</sup>Ferroc Materials Group, Physics Faculty — IMRE, Havana University, Cuba  
[victor\\_koledov@mail.ru](mailto:victor_koledov@mail.ru)

Так называемые гигантские калорические эффекты сопровождают фазовые переходы (ФП) различной природы. Например, в интерметаллидах с термоупругим мартенситным структурным ФП наблюдается эффект памяти формы и обратный ему — эластокалорический эффект. Цель настоящей работы — изучение триглицинсульфата  $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4$  (ТГС). Это одноосный кристалл, представляющий собой классический сегнетоэлектрик и пироэлектрик. ФП в ТГС очень близок ко второму роду типа порядок–беспорядок [1]. Однако измерения показывают (см. рисунок), что пики ДСК при нагреве  $T_1 = 49,0$  °С и при охлаждении



Дифференциальная сканирующая калориметрия  $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4$





структуры  $A2$ . Для структуры  $D0_3$  при малом содержании Si или Al объёмная магнитострикция уменьшается, после чего увеличивается. При приближении к составу  $Fe_3(Si, Al)$  сплавы имеют максимальное для Fe-Si ( $x = 0,23$  ат.%) и минимальное для Fe-Al ( $x = 0,24$  ат.%) сплавов значение магнитострикции соответственно.

Для сравнения на рисунке представлена объёмная магнитострикция сплавов Fe-Ga [2]. Это сравнение оправдано тем, что в сплавах Fe-(Si, Al) и Fe-Ga значения продольной магнитострикции и тетрагонального модуля сдвига близки по значениям. Такое же поведение имеет место для объёмного модуля упругости и объёмной магнитоупругой постоянной, которые и характеризуют величину объёмной магнитострикции. Таким образом, можно сделать вывод, что результаты расчётов объёмной магнитострикции для сплавов Fe-(Si, Al) и Fe-Ga хорошо согласуются между собой.

*Работа выполнена при поддержке Фонда перспективных научных исследований Челябинского государственного университета.*

[1] Ebert H., Ködderitzsch D., Minar J. Rep. Prog. Phys., **74**, 096501 (2011).

[2] Матюнина М. В., Бучельников В. Д., Загребин М. А., Соколовский В. В. Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика», **12**, 57 (2020).





# Магнитокалорический эффект в поликристаллическом сплаве $\text{DyNi}_2$ в магнитных полях до 10 Тл

А. С. Кузнецов<sup>1</sup>, А. В. Маширов<sup>2</sup>, А. М. Алиев<sup>3</sup>, А. О. Петров<sup>2</sup>,  
В. В. Коледов<sup>2</sup>, А. П. Крюков<sup>1</sup>, В. Г. Шавров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия  
*kuznetsovalserg@gmail.com*

<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,  
Москва, Россия *a.v.mashirov@gmail.com*

<sup>3</sup> Институт физики им. Х. И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия  
*lowtemp@mail.ru*

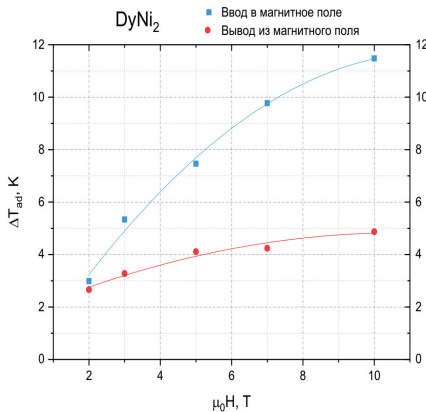
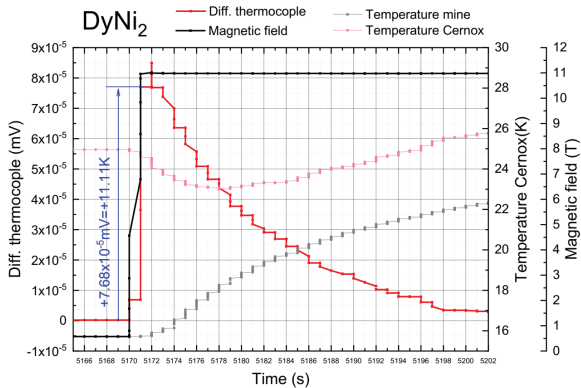
Сплавы фаз Лавеса обладают магнитными фазовыми переходами в области криогенных температур, в области которых наблюдается магнитокалорический эффект [1]. В настоящей работе были проведены прямые измерения магнитокалорического эффекта для сплава  $\text{DyNi}_2$  в сильных магнитных полях до 10 Тл в диапазоне температур 10–70 К.

Измерения магнитокалорического эффекта прямым методом в адиабатических условиях проводились в холодном окне сверхпроводящей криомагнитной системы в магнитных полях до 10 Тл, в диапазоне температур 10–70 К. Прямой метод измерения основывался на вводе или выводе образца во внешнем магнитном поле за время 1 с. Измерительная вставка с исследуемым образцом помещалась в шахту диаметром 29 мм. Механическое перемещение вставки в рабочей области сверхпроводящего магнита обеспечивалось линейным электродвигателем.

Исследуемый образец, изготовленный в виде двух пластин  $5 \times 6 \times 1$  мм, помещался в держатель из ABS-пластика, снабжённый резистивным электронагревателем. Для измерения адиабатического изменения температуры  $\Delta T_{ad}$  использовалась дифференциальная термопара типа Т с диаметром проводов 50 мкм, один из спаев которой был помещён между пластинами образца с помощью клеевого

соединения БФ-6, второй спай приклеивался на поверхность датчика Сепнох. Оба спая термопары размещались в центре магнитного поля соленоида. Таким образом, можно было пренебречь чувствительностью термопары к магнитному полю.

По результатам полуэмпирического расчёта термическое сопротивление в зоне контакта термопары и пластины образца составляло  $R_K = 10^{-4}$  К/Вт, что позволяет сделать вывод о её малой инерционности и быстром времени отклика.



*Временная развёртка измерения магнитокалорического эффекта в магнитном поле 10 Тл при температуре кристаллирования 25 К (вверху). Величина адиабатического изменения температуры в магнитных полях 2, 3, 5, 7 и 10 Тл (внизу)*

В результате прямого измерения магнитокалорического эффекта в квазиadiaбатических условиях в сплаве  $\text{DyNi}_2$  в области фазового перехода при 25 К и магнитном поле 10 Тл было получено значение адиабатического изменения температуры  $\Delta T_{ad} = 11,48$  К, что соответствует полученным ранее результатам в [2].

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10197).*

[1] Tishin A. M., Spichkin Y. I. The magnetocaloric effect it's applications, IOP Publishing Ltd. (2003).

[2] Ćwik J., Koshkid'ko Y., de Oliveira N.A., Nenkov K., Hackemer A., Dilmieva E., Kolchugina N., Nikitin S., Rogacki K. Acta Mater., **133**, 230 (2017).

## Фазовые превращения и структура сплава



Д. Д. Кузнецов<sup>1</sup>, Е. И. Кузнецова<sup>2</sup>, А. В. Маширов<sup>1</sup>,  
В. С. Калашников<sup>1</sup>, А. С. Лошаченко<sup>3</sup>, Д. В. Данилов<sup>3</sup>,  
Г. А. Шандрюк<sup>4</sup>, В. Г. Шавров<sup>1</sup>, В. В. Коледов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева РАН, Москва, Россия

*kuznetsov.dmitry89@gmail.com*

В сплаве номинального состава  $\text{Ni}_{46}\text{Mn}_{41}\text{In}_{13}$  методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), термогравиметрическим анализом (ТГА) просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) изучались фазовые превращения (ФП), а также измерялась

температурная зависимость намагниченности образца при помощи вибративного магнитометра. Исследовалось влияние толщины фольги на температуру начала мартенситного превращения (МП).

Температуры метамагноструктурного фазового перехода определялись по данным зависимости намагниченности от температуры (в диапазоне 50...400 К) в магнитных полях 10, 20 и 30 кЭ и с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии в температурном интервале 100...313 К (данные ДСК в скобках):  $M_s = 226$  К (253 К),  $M_f = 199$  К (164 К),  $A_s = 219$  К (203 К),  $A_f = 240$  К (236 К). С помощью методов ДСК и ТГА была определена температура Кюри,  $T_c = 317$  К.

Установлена зависимость температуры начала мартенситного превращения (МП) от толщины образца в виде клинообразной фольги. Обнаружено, что мартенситная фаза при прямом мартенситном превращении в тонких областях фольги начинает появляться при 215 К (то есть при более низких температурах, чем в объёмном материале), дальнейшее снижение температуры приводит к расширению мартенситной области, однако превращение блокируется на расстоянии 600 нм от края образца.

Методом ПЭМ исследовались МП, промежуточные фазовые превращения и модулированные структуры в нестехиометрическом сплаве NiMnIn. Усреднённый локальный состав в исследуемой области по данным EDX-анализа  $Ni_{41,98}Mn_{37,65}In_{13,00}O_{7,37}$ . Превращение из высокотемпературной аустенитной фазы  $L2_1$  в промежуточную (предмартенситную) фазу характеризовалось появлением диффузного рассеяния в виде тяжёлой на дифракционных картинах, сопровождающееся появлением твидового контраста в виде интенсивных тонких полос на микрофотографиях. Периодичность погасания и усиления наблюдаемого диффузного рассеяния позволяет соотнести его с фоновыми колебаниями атомов, периодически искажающими исходную кристаллическую решётку. При дальнейшем охлаждении сплава на дифракционной картине присутствуют рефлексы, принадлежащие как аустенитной, так и мартенситной фазам. Ниже температуры  $M_s$  происходит сдвиговая перестройка в структуру

мартенситной фазы. Таким образом, сплав испытывает при охлаждении ступенчатое превращение  $L2_1 \rightarrow$  предмартенситная фаза  $\rightarrow$  мартенсит.

*Работа частично выполнена в Междисциплинарном ресурсном центре по направлению «Нанотехнологии», ЦКП Научный парк, СПбГУ.*

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10197).*

## Магнитодиэлектрический эффект в феррит-пьезоэлектрических композиционных материалах

Ю. А. Лупицкая, П. А. Безбородова

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия  
*lupitskaya@gmail.com*

В настоящее время большое внимание уделяется поиску материалов, сочетающих в необходимой комбинации традиционные свойства (магнитные, пьезоэлектрические, диэлектрические), а также обладающих принципиально новыми (гибридными) свойствами [1]. Магнитодиэлектрические материалы (МДЭ) отличаются большим разнообразием свойств и могут служить основой для разработки необходимых в современной СВЧ- и микроэлектронной технике функциональных приборов (модуляторов электромагнитных волн, элементов магнитной памяти и т. п.).

Однако большинство известных однофазных МДЭ-материалов (мультиферроиков) обнаруживают слабый магнитодиэлектрический эффект, что делает такие материалы малоприменимыми для технического применения [1]. Следует ожидать, что композиционный

материал, состоящий из ферритовой и пьезоэлектрической фаз, будет характеризоваться высокими магнитодиэлектрическими коэффициентами, поскольку магнитодиэлектрический коэффициент является результатом пьезомагнитной деформации и пьезоэлектрической генерации заряда.

В работе синтезированы композиционные МДЭ-материалы CF@PZT в виде керамических образцов высокой плотности, определены состав и структура полученных соединений, исследован магнитодиэлектрический эффект в феррит-пьезоэлектрических композиционных материалах.

Анализ микроструктуры полученных композиционных материалов позволил установить тип взаимодействия между магнитной и электрической фазами посредством передачи упругих деформаций на границе кристаллитов (интерфейса). Исследование морфологии поверхности образцов показало, что пьезокерамическая фаза PZT состоит из кристаллитов, имеющих форму многогранников, средний размер которых не превышает 2 мкм.

Установлено, что при внесении образца во внешнее магнитное поле поляризация в композите существенно изменяется, что обусловлено большой эффективной площадью соприкосновения между кристаллитами CF@PZT.

[1] Бичурин М. И., Петров В. М. Физика низких температур, **36**, 680 (2010).

# Термодинамические свойства сплавов Fe-Ga-Al

М. В. Матюнина, М. А. Загребин, В. В. Соколовский,  
В. Д. Бучельников

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия  
*matunins.fam@mail.ru*

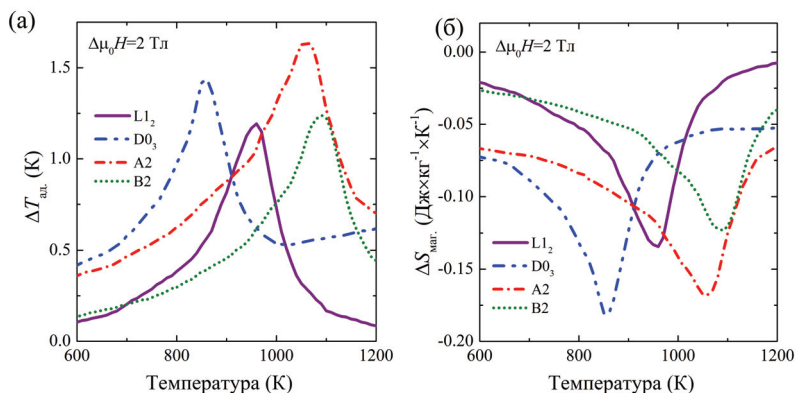
Магнитострикционные сплавы на основе систем Fe-Ga интенсивно исследуются в течение последних 20 лет. Характерной особенностью поведения магнитострикции от концентрации в данных сплавах является наличие двух пиков, в области  $\approx 19$  и  $\approx 27$  ат.% [1; 2]. Данная зависимость тесно связана со структурой и фазовым составом. Второй пик магнитострикции обусловлен наличием однофазной области  $D0_3$ , а последующее уменьшение магнитострикции при содержании Ga выше 27 ат.% связывают с наличием упорядоченной равновесной  $L1_2$ -фазы, обладающей отрицательной магнитострикцией [3]. Кроме этого, высокое содержание Ga приводит к хрупкости сплавов, что затрудняет механическую обработку. Для улучшения функциональных свойств системы Fe-Ga легируют небольшим количеством атомов Al. Электронные конфигурации Al и Ga подобны, и в области содержания до 30 ат.% Al и Ga системы Fe-Ga и Fe-Al обладают схожими характеристиками [3]. Легирование сплавов Fe-Ga атомами Al, с одной стороны, приводит к уменьшению магнитострикции [4], с другой стороны — к повышению механических характеристик, включая обрабатываемость [5]. В настоящей работе проведено исследование влияния добавки атомов Al на термодинамические свойства сплавов Fe-Ga в области второго пика магнитострикции.

Исследование выполнено при помощи метода проекционных присоединённых волн, реализованного в программном пакете VASP [6; 7], и моделирования методом Монте-Карло при конечных температурах. В рамках первопринципных расчётов были определены равновесные параметры решёток, постоянные тензора упругости, температуры Дебая для кристаллических структур  $A2$ ,  $B2$ ,  $D0_3$

и  $L1_2$  сплавов  $Fe_{73,44}Ga_{21,87}Al_{4,69}$ ,  $Fe_{71,87}Ga_{23,44}Al_{4,69}$  и  $Fe_{70,31}Ga_{25}Al_{4,69}$ . Также были рассчитаны параметры магнитного обменного взаимодействия в рамках программного пакета SPR-KKR [8]. Методом Монте-Карло в трёхмерной модели Гейзенберга в отсутствие анизотропии проведены расчёты температурных зависимостей намагниченности и термодинамических характеристик исследуемых структур.

Расчёт энергии основного состояния исследуемых кристаллических структур сплава  $Fe_{73,44}Ga_{21,87}Al_{4,69}$  показал, что наиболее энергетически выгодной структурой является  $L1_2$ , как и в случае бинарного сплава  $Fe_{73,44}Ga_{26,66}$ . Замена атомов Ga в объёме 4,69 ат.% атомами Al приводит к увеличению температуры Дебая в фазах  $D0_3$  и  $L1_2$  на 79 К и 78 К соответственно и, как результат, к смещению температуры структурного перехода  $L1_2 \rightarrow D0_3$  в область более высоких температур (590 К в сплаве  $Fe_{73,44}Ga_{26,66}$  [9], 620 К в сплаве  $Fe_{73,44}Ga_{21,87}Al_{4,69}$ ).

На рисунке представлены температурные зависимости адиабатического изменения температуры  $\Delta T_{ад}$  и изотермического изменения энтропии  $\Delta S_{маг}$  при изменении магнитного поля от 0 до 2 Тл. Показано, что добавка Al приводит к уменьшению  $\Delta T_{ад}$  в структуре  $L1_2$



Температурная зависимость (а) адиабатического изменения температуры  $\Delta T_{ад}$  и (б) изотермического изменения энтропии  $\Delta S_{маг}$ , полученная моделированием методом Монте-Карло для структур A2, B2,  $D0_3$  и  $L1_2$  сплавов  $Fe_{73,44}Ga_{21,87}Al_{4,69}$  при изменении магнитного поля  $\Delta\mu_0 H = 2$  Тл









# Кинетические особенности структурного фазового перехода в быстрозакалённом сплаве $Ti_2NiCu$

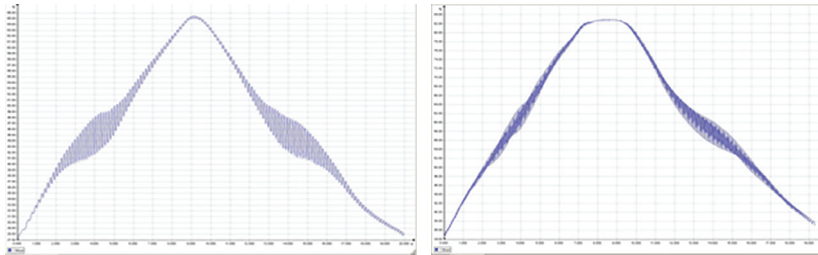
Е. В. Морозов, В. В. Коледов, В. Г. Шавров

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова, Москва, Россия

evgvmorozov@gmail.com

Во всём мире интенсивно исследуются калорические эффекты в твердотельных функциональных материалах [1–5], включая магнитокалорический, электрокалорический, эластокалорический, барокалорический и др. эффекты. Однако эти исследования проходят, как правило, при сравнительно медленном воздействии внешних полей. Фундаментальная проблема перераспределения энергии между подсистемами в твёрдых телах до сих пор далека от решения. Проблема же быстрых процессов, происходящих при кратковременном воздействии внешних полей на твердотельный материал, изучена ещё слабее и, бесспорно, является фундаментальной и практически очень важной.

Настоящая работа направлена на изучение структурного термоупругого фазового перехода в сплаве  $Ti_2NiCu$  с эффектом памяти формы (ЭПФ), путём изучения кинетики, последовательного циклического воздействия внешних полей упругих напряжений



(а)

(б)

Эластокалорический эффект при частоте циклов растяжения-сжатия:  
7,5 Гц (а); 20 Гц (б)



# Влияние микроструктуры на магнитокалорический эффект в сплаве Гейслера системы Ni<sub>2</sub>MnGa

И. И. Мусабилов<sup>1</sup>, И. М. Сафаров<sup>1</sup>, Р. М. Галеев<sup>1</sup>, Р. Ю. Гайфуллин<sup>2</sup>,  
А. М. Алиев<sup>3</sup>, А. Б. Гаджиев<sup>3</sup>, В. В. Коледов<sup>4</sup>, Р. Р. Мулюков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

<sup>2</sup> Башкирский государственный университет, Уфа, Россия

<sup>3</sup> Институт физики им. Х. И. Амирханова ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

<sup>4</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

*irekmusabirov@mail.ru*

Сплавы Гейслера принадлежат к классу перспективных функциональных материалов. В области мартенситного превращения наблюдаются такие эффекты, как магнитоуправляемая память формы и магнитокалорический эффект. Пониженные эксплуатационные свойства материала ограничивают перспективы его практического применения. Применение к сплавам деформационно-термической обработки позволит повысить механические свойства материала. Однако при этом возможно сильное снижение функциональных эффектов. В данной работе показана возможность применения к сплаву Гейслера системы Ni-Mn-Ga деформационно-термической обработки методом всесторонней изотермическойковки при 680 °С и степенью деформации  $e = 1,9$ . Показано, что в результатековки исходной равноосной зёрненной микроструктуры с размером зерна около 100–200 мкм сформировалась двухкомпонентная микроструктура, в которой исходные крупные зёрна размером около 100 мкм окружены прослойкой мелкозернистой микроструктуры. При этом характеристические температуры мартенситного превращения сместились в область более низких температур на величину около 10 °С. Анализ магнитокалорического эффекта в области мартенситного и магнитного фазовых превращений выполнен в высокочастотном знакопеременном магнитном поле 0,5 и 2 кЭ (рисунок).



# Моделирование процессов теплопереноса в ячейках, изготовленных из материалов, обладающих магнитокалорическим эффектом

О. О. Павлухина, В. В. Соколовский, В. Д. Бучельников,  
М. А. Загребин

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия  
*pavluhinaoo@mail.ru*

Существенным фактором, стимулирующим теоретические и экспериментальные исследования в области магнитокалорических свойств твёрдых тел, является возможность их практического применения. В первую очередь это связано с тем, что предложены эффективные термодинамические циклы и разработаны конструкции, в которых магнитокалорические материалы выступают в качестве рабочего тела магнитных холодильных машин [1]. Большое количество интерметаллических сплавов и соединений, включая Mn-Ga-(C, N), Gd-Si-Ge, Fe-Rh, La-Fe-(Si, Al), Ni-Mn-(Ga, In, Sn, Sb) и Mn-Fe-(P, As), являются перспективными кандидатами для технологии магнитного охлаждения [2–4].

Выбор геометрии ячейки магнитного охлаждения является на сегодняшний день актуальной задачей в области магнитного охлаждения. В настоящей работе исследованы два типа геометрии расположения проводов в ячейки магнитного охлаждения, а также влияние расположения проводов на протекание процессов теплопереноса. При исследовании процессов теплопереноса решалась система дифференциальных уравнений, состоящая из уравнений: непрерывности, Навье — Стокса и уравнений теплопроводности для жидкости и твёрдого тела. В данной работе моделирование было выполнено на трёхмерной ячейке магнитного охлаждения. Получены данные о распределении температур, распределении поля скоростей, давлении и тепловом градиенте.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ  
в рамках проекта № 17-72-20022 и Министерства науки*



- [1] Kitanovski A., Peter W. E. Int. J. Refrig., **29**, 3–21 (2006).
- [2] Liu J. et al. Nature Mater., **11**, 620 (2012).
- [3] Das R. et al. J. Appl. Phys., **109**, 07A901 (2011).
- [4] Cong D. Y., Roth S., Schultz L. Acta Mater., **60**, 5335 (2012).

## Магнитные свойства и магнитокалорический эффект сплавов замещения GdTSi

А. Г. Кучин<sup>1</sup>, С. П. Платонов<sup>1</sup>, В. С. Гавико<sup>1,2</sup>, М. Ю. Яковлева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург,  
Россия [platonov@imp.uran.ru](mailto:platonov@imp.uran.ru)

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Интерметаллические соединения GdTSi кристаллизуются в тетрагональную структуру типа CeFeSi ( $P4/nmm$ ), которая образована чередующимися слоями (001) в следующей последовательности: Gd-Si-T2-Si-Gd-Gd-Si-T2-Si-Gd ( $T = \text{Ti, Mn, Fe, Co}$ ). Гибридизация Si  $p$  и T  $3d$  состояний приводит к отсутствию магнитного момента ионов Fe или Co в соединениях GdTSi. Таким образом, магнитные свойства сплавов GdTSi зависят как от межатомных расстояний, так и от числа  $3d$  электронов. Представляет интерес исследование магнитных и структурных свойств сплавов замещения  $\text{GdFe}_{1-x}\text{T}_x\text{Si}$  с  $T = \text{Ti}$  [1], V, Cr, Fe с разными радиусами атомов (1,462, 1,346, 1,36, 1,274 Å) и числом  $3d$  электронов (2, 3, 5, 6).

Увеличение содержания Ti, V, Cr в системе  $\text{GdFe}_{1-x}\text{T}_x\text{Si}$  приводит к увеличению параметра кристаллической решётки  $c$ , в то время как

изменение параметра  $a$  незначительно. Температура Кюри  $T_C$  значительно возрастает, несмотря на увеличение межатомных расстояний и замещение атомов Fe немагнитными ионами T. Уменьшение числа  $3d$  электронов в системе  $GdFe_{1-x}T_xSi$  приводит к увеличению числа нескомпенсированных  $3d$  электронов. Благодаря этому косвенные обменные взаимодействия между ионами Gd усиливаются, и, следовательно, увеличивается  $T_C$ .

Чем больше разница в числе  $3d$  электронов для Fe и T, тем сильнее возрастает  $T_C$  сплава  $GdFe_{1-x}T_xSi$ . В то же время, чем меньше радиус атома T, тем больше ожидается его растворимость в  $GdFe_{1-x}T_xSi$ . Растворимость Ti составляет примерно  $x = 0,2$ , в то время как для V и Cr растворимость возрастает до  $x = 0,3$  и  $0,5$  соответственно. В результате  $T_C$  сплава  $GdFe_{0,8}Cr_{0,2}Si$  (210 К) значительно выше  $T_C$  сплава  $GdFe_{0,8}Ti_{0,2}Si$  (190 К), а  $T_C$  сплава  $GdFe_{0,5}Cr_{0,5}Si$  достигает 255 К.

Сплавы замещения с Cr или V, обладающими меньшими атомными радиусами, более однородны по сравнению со сплавами с Ti и, следовательно, обладают более высоким магнетокалорическим эффектом.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 18-72-10098.*

[1] Kuchin A., Platonov S. et al. IEEE Magnetics Letters, **10**, 2509204 (2019).



# Магнитные и магнитотепловые свойства соединений $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0,84}Fe_{0,16})_2$

М. С. Аникин<sup>1</sup>, Е. Н. Тарасов<sup>1</sup>, М. В. Рагозина<sup>1,2</sup>, Е. В. Потапов<sup>1</sup>,  
А. В. Зинин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*maksim.anikin@urfu.ru*

<sup>2</sup> Институт физики металлов УрО РАН им. М. Н. Михеева, Екатеринбург, Россия

*maria.ragozina@inbox.ru*

Ранее при исследовании соединений  $R(Co-Fe)_2$  с тяжёлыми редкоземельными металлами (R) было обнаружено, что при увеличение атомного номера R возникает платоподобная температурная зависимость изотермического изменения магнитной части энтропии ( $\Delta S_m$ ), связанная с возникновением дополнительного пика  $\Delta S_m(T)$  ниже температуры Кюри ( $T_C$ ) [1]. Возникновение дополнительного пика более ярко выражено на соединениях, где величина энергии межподрешёточного обменного взаимодействия R-3d меньше [1; 2].

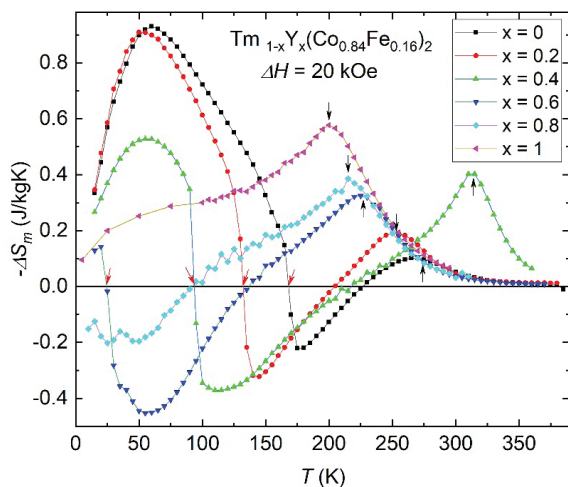
При замещении части атомов R на Y в соединении  $Er_{1-x}Y_x(Co_{0,84}Fe_{0,16})_2$  авторам удалось сохранить платоподобную зависимость даже при 40 % замещении, при незначительном снижении максимальных значений  $\Delta S_m$  [3]. Замещение 60 % Er на Y привело к возникновению точки магнитной компенсации, хотя и в таком случае максимальные значения  $\Delta S_m$  упали только на 25 % относительно исходного соединения. Поэтому в данной работе исследована система  $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0,84}Fe_{0,16})_2$ , где энергия межподрешёточного обменного взаимодействия R-3d заведомо меньше, чем в случае с Er [2].

Соединения  $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0,84}Fe_{0,16})_2$  ( $x = 0-1$ ) были выплавлены в дуговой печи в атмосфере гелия с последующей гомогенизацией. Рентгеноструктурный анализ показал, что все образцы принадлежат к кубической фазе Лавеса C15 с пространственной группой

*Fd – 3m*. Параметр кристаллической решётки (*a*) при увеличении содержания иттрия (*x*) непрерывно растёт. В то же время  $T_c$  уменьшается от 274 до 200 К с увеличением содержания иттрия, что свидетельствует об ослаблении межподрешёточного обменного взаимодействия. Наличие локального максимума  $T_c$  при  $x = 0,4$  может быть связано с неэквивалентным замещением туллия на итрий, приводящим то к ослаблению, то к усилению межподрешёточного обменного взаимодействия.

На кривой намагничивания образца с  $x = 0,6$ , измеренной при 5 К в магнитном поле ( $H$ ) до 90 кЭ наблюдается область, при  $H > 49,5$  кЭ, соответствующая либо частичному коллапсу магнитного момента  $Co$ , либо неколлинеарной магнитной структуре соединения [4].

На рисунке представлены рассчитанные из серии кривых намагничивания температурные зависимости  $\Delta S_m$  при изменении внешнего магнитного поля от 0 до 20 кЭ. Для всех соединений с  $x \leq 0,6$  наблюдаются точки магнитной компенсации и, как следствие, чередования прямого и обратного магнитокалорического эффекта. В соединениях с  $x \geq 0,8$  результирующий магнитный момент сона-



Температурные зависимости  $\Delta S_m$  соединений  $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$  в различных по напряжённости магнитных полях. Точки Кюри отмечены чёрными стрелками, точки магнитной компенсации — красными



# Влияние обменно-корреляционных эффектов на магнитные магнитокалорические свойства сплава Fe-Rh

В. В. Соколовский, О. О. Павлухина, Д. Р. Байгутлин,  
В. Д. Бучельников

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия  
*vsokolovsky84@mail.ru*

В течение нескольких десятилетий ведутся интенсивные теоретические исследования магнитных, структурных, электронных и термодинамических свойств сплавов Fe-Rh. Одним из важных вопросов является оценка решёточного ( $\Delta S_{lat}$ ), магнитного ( $\Delta S_{mag}$ ) и электронного ( $\Delta S_{el}$ ) вкладов энтропии в полное изменение энтропии  $\Delta S$  в точке фазового перехода. Например, в работе [1] акцент сделан на доминирующую роль  $\Delta S_{el}$ , в работах [2; 3] обсуждается существенная роль вклада  $\Delta S_{mag}$ . Напротив, в работе [4] обращено внимание на преобладающий вклад  $\Delta S_{lat}$ . Тем не менее, несмотря на имеющиеся теоретические (первопринципные) исследования сплавов Fe-Rh, вопрос предсказания температуры метамагнитного перехода и оценки энтропийных вкладов остаётся открытым. Это обусловлено следующими факторами: большая разница в энергии между антиферромагнитной (АФМ) и ферромагнитной (ФМ) фазами [3; 4], высокая температура Дебая для ФМ-фазы ( $\Theta_D \approx 384$  К) по сравнению с АФМ-фазой ( $\Theta_D \approx 331$  К) [5] и наличие мягких фононных мод в АФМ-фазе [4; 5]. В этой связи решение данных вопросов представляется интересным и актуальным.

Настоящая работа посвящена теоретическим оценкам температуры метамагнитного перехода и энтропийных вкладов в сплаве Fe-Rh эквиатомного состава в рамках теории функционала плотности и квазигармонической модели Дебая. Первопринципные расчёты проводились с использованием метода проекционных плоских волн, реализованного в программном пакете VASP [6]. Для описания обменно-корреляционных эффектов выбраны приближе-



( $\Theta_D \approx 441$  K). У счётном значений энергий и температур Дебая для каждой из фаз предсказана температура метамагнитного перехода ( $T_m \approx 300$  K) исходя из пересечения свободных энергий. Данная величина является близкой к экспериментальным данным [4]. Кроме того, оценка энтропийных вкладов в точке перехода с помощью функционала SCAN даёт результаты, схожие с работой [5]. Мы полагаем, что в случае исследования сплавов Fe-Rh важно учитывать дополнительные обменно-корреляционные эффекты с целью корректного описания свойств основного состояния.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-72-20022.*

- [1] Tu P. et al. J. Appl. Phys., **40**, 1368 (1969).
- [2] Gruner M. E. et al. Phys. Rev. B67, 064415 (2003).
- [3] Sandratskii L. M., Mavropoulos P. Phys. Rev., B83, 174408 (2011).
- [4] Wolloch M. et al. Phys. Rev. B94, 174435 (2016).
- [5] Martinho Vieira R. et al. J. Alloys Compd., **857**, 157811 (2021).
- [6] Kresse G., Furthmüller J. Comp. Mater. Sci., **6**, 15 (1996).
- [7] Perdew J. P., Burke K., and Ernzerhof M. Phys. Rev. Lett., **77**, 3865 (1996).
- [8] Sun J., Ruzsinszky A., Perdew J. P. Phys. Rev. Lett., **115**, 036402 (2015).





# Cryogenic Magnetic Cooling for Natural Gas Liquefaction: Materials, Challenges and Prospective

S. Taskaev<sup>1</sup>, V. Khovaylo<sup>2</sup>, K. Skokov<sup>1</sup>, M. Ulyanov<sup>1</sup>, D. Bataev<sup>1</sup>,  
D. Plakhotskiy<sup>1</sup>, M. Bogush<sup>1</sup>, D. Karpenkov<sup>2</sup>, A. Karpenkov<sup>2</sup>,  
M. Utarbekova<sup>1</sup>, A. Basharova<sup>1</sup>, M. Gavrilova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

*tsv@csu.ru*

<sup>2</sup> NUST «MISiS», Moscow, Russia

*khovaylo@misis.ru*

Natural gases are one of the main sources of energy nowadays and in the near future. Currently, there is an upward trend of the production and consumption of this type of energy in all market segments including methane, hydrogen, oxygen etc. For the storage and transportation of this type of energy, liquefaction is needed, but this process requires complex energy-intensive compressor devices operating at cryogenic temperatures. However, the efficiency by traditional liquefaction methods is quite low at temperatures below 150 K, yet there is a fundamentally different approach to liquefy gases as a storehouse of future energy — the emerging magnetic cooling technology. Taking into account the recent progress in the development of superconducting magnets with magnetic fields up to 15–22 T, this type of cooling at cryogenic temperatures can make a revolution in the technology of gas liquefaction. A review on recent scientific publications reveals the large variety of different magnetic materials showing a significant magnetocaloric effect in the temperature region of interest from 15 to 150 K. This makes it possible to initiate the efficient liquefaction of almost any natural gas in the same type of magnetic cooling machine.

This is certainly the heart of any magnetic cooling device transferring the heat from the low to the high temperature reservoir. The most interesting compounds are ferromagnetic materials operating near their Curie temperature, because in its vicinity the greatest magnetocaloric effect is observed.

In this work, we examine different rare earths (RE) based alloys in a form of Laves phases and other intermetallic compounds such as RE-Al<sub>2</sub>, RE-Ni<sub>2</sub> and RE<sub>5</sub>Si<sub>4</sub>. Combining different 4-*f* elements in the rare earth sublattice of an alloy one can easily tune Curie point and as a consequence create a set of magnetocaloric materials which exhibit a large magnetocaloric effect at low temperatures from one hand and could be utilized in a wide temperature range from other hand by stacking different alloys in AMR device. The possible application of synthesized alloys is in natural gas liquefying devices as a magnetocaloric refrigerants.

## Магнитокалорический эффект и магнитные свойства сплава Pr<sub>2</sub>In в полях до 10 Тл

М. Н. Ульянов<sup>1,4</sup>, С. В. Таскаев<sup>1,2</sup>, В. В. Ховайло<sup>3</sup>, М. Ю. Богущ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия  
*tsv@csu.ru*

<sup>3</sup> Московский институт стали и сплавов, Москва, Россия  
*khovaylo@gmail.com*

<sup>4</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия  
*max-39@yandex.ru*

Под магнитокалорическим эффектом (МКЭ) понимается изменение термодинамического (теплового) состояния магнитного материала при изменении степени его магнитного упорядочения. Изменение теплового состояния образца проявляется как изменение его температуры или как изменение магнитной части энтропии образца и, соответственно, характеризуется двумя величинами —





В частности, будут описаны результаты исследований магнитокалорического эффекта в сильных магнитных полях, которые представляют интерес с точки зрения использования сверхпроводящих магнитов в технологии ожижения криогенных газов.

- [1] Zhang H., Gimaev R., Kovalev B. et al. *Physica*, B558, 65 (2019).
- [2] Gimaev R., Spichkin Y., Kovalev B. et al. *Int. J. Refrig.*, **100**, 1 (2019).
- [3] Kitanovski A. *Adv. Energy Mater.*, **10**, 1903741 (2020).
- [4] Kim Y., Park I., Jeong S. *Cryogenics*, **57**, 113 (2013).

## Обратный магнитокалорический эффект в литом $Gd_2In$ в области криогенных температур

В. Г. Шавров<sup>1</sup>, А. П. Каманцев<sup>1</sup>, Ю. С. Кошкидько<sup>1,2</sup>,  
С. В. Таскаев<sup>1,3,4</sup>, М. Н. Ульянов<sup>3</sup>, М. Ю. Богущ<sup>3</sup>, J. Świąk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

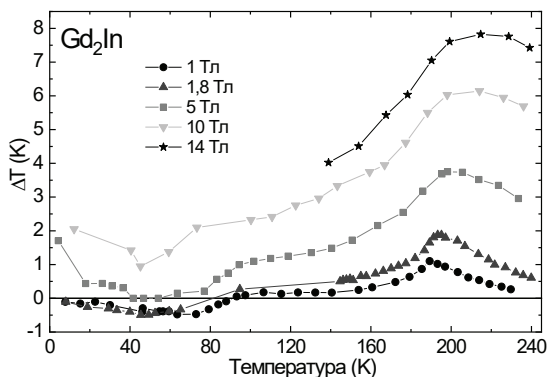
*shavrov@cplire.ru*

<sup>2</sup> Institute of Low Temperature and Structure Research of PAS, Wrocław, Poland

<sup>3</sup> Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>4</sup> Южно-уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия

Исследован магнитокалорический эффект (МКЭ) в образцах сплава  $Gd_2In$  в широком диапазоне температур 4–240 К в полях биттеровского магнита до 14 Тл. Максимальное обнаруженное значение обратного МКЭ в сплаве  $Gd_2In$  в области метамгнитного перехода из антиферромагнитной в ферромагнитную фазу составило  $\Delta T = -0,5$  К в поле 1,8 Тл. При увеличении магнитного поля до 5 Тл обратный МКЭ исчезает, что обусловлено конкуренцией двух



*Температурные зависимости адиабатического изменения температуры  $\Delta T$  в сплаве  $Gd_2In$ , полученные прямым методом в магнитных полях от 1 до 14 Тл при начальных температурах 4–240 К*

вкладов разных знаков в общий МКЭ. Прямой МКЭ вблизи температуры Кюри монотонно возрастает с увеличением магнитного поля, причём наблюдается смещение максимума МКЭ в область более высоких температур. Максимальное обнаруженное значение прямого МКЭ вблизи точки Кюри в сплаве  $Gd_2In$ :  $\Delta T = 7,8$  К в поле 14 Тл (рисунок).

*Работа поддержана РФФ, проект № 20-19-00745.*

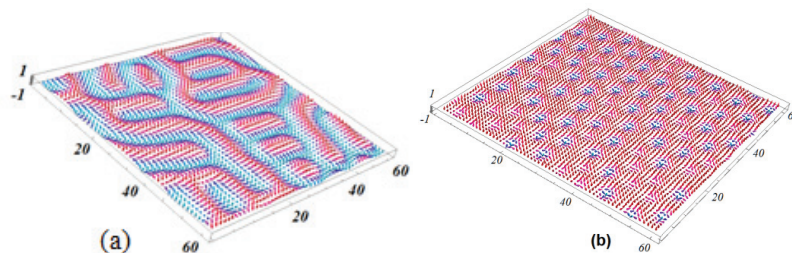
# Фазовые переходы в решётке скирмионов

И. Ф. Шарафуллин, А. Х. Баишева, Э. А. Ахметзянова,  
А. Р. Гайнуллин

Башкирский государственный университет, Уфа, Россия  
*sharafullinif@yandex.ru*

Описание и построение корректных моделей процессов формирования и устойчивости скирмионов является актуальной задачей как с точки зрения фундаментальной науки, так и практических приложений, поэтому попытки построить модели взаимодействия скирмионов на интерфейсах различных сред между различными связанными подсистемами предпринимаются разными исследовательскими группами [1].

В данной работе рассматривается магнитоэлектрическая сверхрешётка, образованная из чередующихся «фрустрированных» магнитных и сегнетоэлектрических плёнок. Фрустрации, возникающие из-за конкурирующих взаимодействий между различными спиновыми парами, были исследованы в течение последних четырёх десятилетий. Нами показано, что фрустрация приводит к усилению скирмионной структуры, возникающей в результате конкуренции неколлинеарного магнитоэлектрического взаимодействия и внешнего магнитного и электрического полей, приложенных перпендикулярно к плоскости плёнок (рисунок).



*Трёхмерная визуализация конфигурации основного состояния на интерфейсе магнитной плёнки для слабой фрустрации (а), сильно фрустрированной магнитной плёнки (б)*

Выявлена роль толщин каждой из плёнок на область существования и процессы формирования и разрушения скирмионной периодической структуры. С помощью метода Монте-Карло моделирования построены фазовые диаграммы, демонстрирующие зависимости параметров фрустраций и магнитоэлектрических взаимодействий от критических температур, а также исследованы особенности фазовых переходов из скирмионной фазы в сверхрешётке.

[1] El Hog S., Kato F., Koibuchi H., Diep H. T. J. Magn. Magn. Mater., **498**, 166095 (2020).







<i>Загребин М. А., Матюнина М. В., Соколовский В. В., Бучельников В. Д.</i>	
Магнитные свойства сплавов Fe-Ge, легированных Al: исследования из первых принципов . . . . .	19
<i>Гамзатов А. Г., Алиев А. М., Хизриев Ш. К., Кадырбардыев А. Т., Батдалов А. Б., Ханов Л. Н., Yen N. H., Dan N. H., Yu S.-C.</i>	
Магнитокалорические и магнитотранспортные свойства ленточного образца сплава Гейслера $Ni_{45}Co_5Mn_{31}Al_{19}$ . . . . .	22
<i>Каманцев А. П., Амиров А. А., Алиев А. М., Коледов В. В., Шавров В. Г.</i>	
Бесконтактное измерение магнитокалорического эффекта . . . . .	24
<i>Карпунин Д. А., Терентьев Ю. А., Шавров В. Г., Коледов В. В., Малинецкий Г. Г., Сысоев М. А., Бражник П. С., Зименкова Т. С., Куренков П. В., Камынин А. В., Дроздов Б. В., Ковалев К. Л., Сафонов А. А., Полтавец В. Н., Шилло С. В., Нижельский И. В., Бабачанов И. В., Балабанов В. К., Герман И. В., Ларюхин В. С., Петров А. О., Фонгратовски С. В., Каманцев А. П., Дильмиева Э. Т., Самвелов А. В., Палчаев Д. К.</i>	
YBaCuO — материал на основе сверхпроводника, используемый в магнитной левитации . . . . .	26
<i>Коледов В. В., Шавров В. Г., Быбик М. С., Калашиников В. С., Несолонов А. В., Кузнецов Д. Д., Фонгратовски С. В., Каманцев А. П., Шандрюк Г. А., Peláiz-Barranco A.</i>	
Поиск гигантского электрокалорического эффекта в пироэлектрическом соединении триглицинсульфат . . . . .	29
<i>Кошкин А. Б., Загребин М. А., Матюнина М. В., Бучельников В. Д.</i>	
Объёмная магнитострикция сплавов $Fe_{100-x}(Si, Al)_x$ : исследования из первых принципов . . . . .	30
<i>Кузнецов А. С., Маширов А. В., Алиев А. М., Петров А. О., Коледов В. В., Крюков А. П., Шавров В. Г.</i>	
Магнитокалорический эффект в поликристаллическом сплаве $DyNi_2$ в магнитных полях до 10 Тл . . . . .	33



<i>Taskaev S., Khovaylo V., Skokov K., Ulyanov M., Bataev D., Plakhotskiy D., Bogush M., Karpenkov D., Karpenkov A., Utarbekova M., Basharova A., Gavrilova M.</i>	
Cryogenic Magnetic Cooling for Natural Gas Liquefaction: Materials, Challenges and Prospective . . . . .	57
<i>Ульянов М. Н., Таскаев С. В., Ховайло В. В., Богуш М. Ю.</i>	
Магнитокалорический эффект и магнитные свойства сплава Pr <sub>2</sub> In в полях до 10 Тл. . . . .	58
<i>Ховайло В. В., Таскаев С. В.</i>	
Материалы для магнитного охлаждения при криогенных температурах . . .	60
<i>Шавров В. Г., Каманцев А. П., Кошкидько Ю. С., Таскаев С. В., Ульянов М. Н., Богуш М. Ю., Свик J.</i>	
Обратный магнитокалорический эффект в литом Gd <sub>2</sub> In в области криогенных температур . . . . .	61
<i>Шарафуллин И. Ф., Баишева А. Х., Ахметзянова Э. А., Гайнуллин А. Р.</i>	
Фазовые переходы в решётке скирмионов . . . . .	63

*Научное издание*

**ДНИ КАЛОРИКИ В ЧЕЛЯБИНСКЕ:  
Функциональные материалы и их приложения**

*Сборник тезисов*

*16–20 августа 2021 г.*

*Челябинск, Россия*

Корректурa и вёрстка *М. В. Трифоновой*  
 Подписано в печать 12.08.21. Формат 60×84 1/16.  
 Усл. печ. л. 4,0. Уч.-изд. л. 3,6. Тираж 500 экз. Заказ 378. Цена договорная

Челябинский государственный университет  
 454001, Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129  
 Отпечатано в издательстве Челябинского государственного университета  
 454021, Челябинск, ул. Молодогвардейцев, 576