НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, 2021, том 57, № 8, с. 805–812

УДК 537.611.44544.163

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭВТЕКТИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА GaSb–Fe_3Ga_4

© 2021 г. И. Х. Мамедов[1], К. И. Янушкевич[2], Д. Г. Араслы[3], Р. Н. Рагимов[3, *], А. А. Халилова[3], А. В. Аплевич[2], А. И. Галяс[2]

[1]Национальная академия авиации Азербайджана, пр. Мердакан, 30, Баку, Az-1045 Азербайджан

[2]ГНПО "Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению", ул. П. Бровки, 19, Минск, 220072 Беларусь

[3]Институт физики Национальной академии наук Азербайджана, пр. Г. Джавида, 33, Баку, Az-1143 Азербайджан

*e-mail: rashad@physics.science.az

Поступила в редакцию 19.06.2020 г.
После доработки 01.04.2021 г.
Принята к публикации 05.04.2021 г.

Синтезирован магнитный полупроводниковый эвтектический композит GaSb–Fe_3Ga_4. Проведен рентгенофазовый анализ при разных температурах, определен элементный состав матрицы, металлических включений и межфазной зоны. Пондеромоторным методом в интервале температур ~80–750 K и вибрационным методом при 4.6 и 295 K в магнитных полях с индукцией до $B = \pm 14$ Тл изучены особенности удельной намагниченности и магнитной восприимчивости. Показано, что эвтектический композит GaSb–Fe_3Ga_4 обладает свойствами магнитного вещества с температурой Кюри $T_C = 355$ K. Установлено, что при температуре жидкого азота эвтектический композит имеет удельную намагниченность $\sigma \approx 1.5$ А м^2 кг и средний магнитный момент $\mu \approx 0.17\mu_B$. Выявлено, что магнитные характеристики эвтектического композита устойчивы к тепловым нагрузкам до 750 K и воздействию внешних магнитных полей до 14 Тл.

Ключевые слова: эвтектический композит, элементный состав, удельная намагниченность, магнитная восприимчивость

DOI: 10.31857/S0002337X21080200

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что соединения III–V групп Периодической системы элементов при определенных концентрациях 3*d*-переходных металлов образуют эвтектические композиты [1]. Такие эвтектические композиты являются магнитными полупроводниками с матрицей из элементов III–V групп и магнитными включениями в виде кластеров, содержащих 3*d*-элементы и атомы основной матрицы. Присутствие равномерно распределенных магнитных примесей придает эвтектическим композитам уникальные свойства. На их основе созданы гальвано-, фототермомагнитные, оптические и тензометрические приборы [2–13]. Актуальность синтеза, изучения магнитных свойств и электронного транспорта обусловлена востребованностью новых многофункциональных материалов для матриц устройств спинтроники с целью реализации возможностей управления их свойствами путем вариации размеров и концентрации магнитных включений [14–17]. Одним из перспективных магнитных полупроводниковых эвтектических композитов является GaSb–Fe_3Ga_4.

Микроструктурные исследования [1] показали, что бинарный эвтектический композит GaSb с Fe–Ga-фазой образуется при содержании 3 мас. % Fe и эквивалентного формуле $FeGa_{1.3}$ количества Ga. Авторами также отмечено, что эвтектический состав формируется в начале слитка, а в конце слитка появляются другие Fe-содержащие фазы и возможны незначительные отклонения от формулы $FeGa_{1.3}$ в обогащенную или обедненную железом стороны. Ориентация включений в GaSb достигается при отверждении расплавов, и они обладают, как отмечено авторами, составом Fe_3Ga_4. Температура отверждения эвтектического сплава – 968 ± 2 K.

Известно, что GaSb обладает структурой цинковой обманки с параметром элементарной ячейки $a = 6.0959(\pm 3)$ Å [18], а регулярно распределенные магнитные включения фазы Fe_3Ga_4 имеют моноклинную кристаллическую решетку с параметрами элементарной ячейки $a = 10.102$, $b = 7.666$, $c = 7.881$ Å и $\beta = 106.26°$ [19–22].

Наши предыдущие работы посвящены исследованию электрических и тепловых свойств эвтекти-

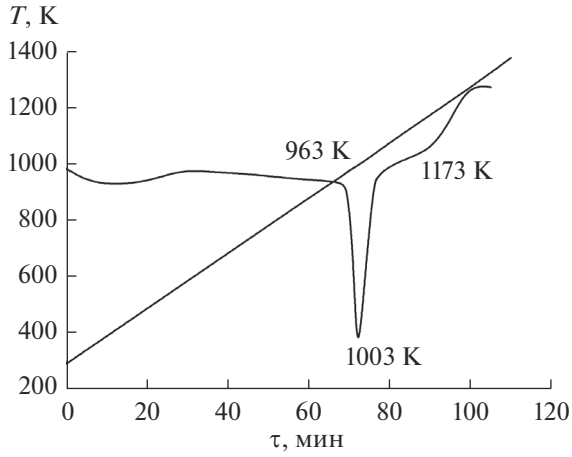

Рис. 1. ДТА-кривая эвтектического композита GaSb–Fe_3Ga_4.

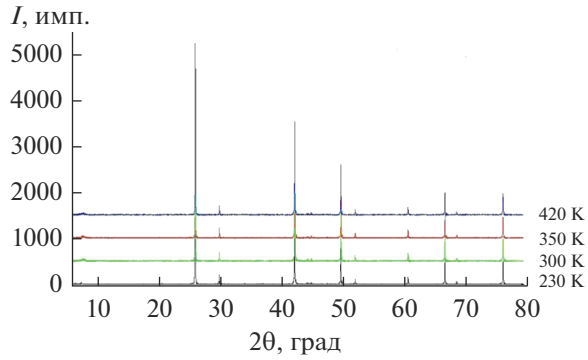

Рис. 2. Рентгенограммы эвтектического композита GaSb–Fe_3Ga_4 при температурах 230, 300, 350 и 420 K.

ческого композита GaSb–Fe_3Ga_4 [8–10]. Определены кинетические коэффициенты, выявлены особенности механизмов электронных и фононных процессов, созданы термостабильные, безгистерезисные тензодатчики с линейными характеристиками [12]. В ряду характеристик, важных для практических применений GaSb–Fe_3Ga_4, отсутствуют сведения о магнитных свойствах.

Цель настоящей работы – изучение магнитных характеристик эвтектического композита GaSb–Fe_3Ga_4 в широком интервале температур и воздействия внешних магнитных полей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Антимонид галлия *p*-типа проводимости с концентрацией дырок 4×10^{17} см$^{-3}$ получен стандартным методом сплавления компонентов (Ga марки 6N-99,9997 и Sb Cy-000) в стехиометрических количествах с последующей очисткой.

Эвтектический композит получен по методике [1] вертикальным методом Бриджмена со скоростью движения фронта кристаллизации 1.0 мм/мин при строгом выполнении условия перпендикулярности плоскости фронта кристаллизации направлению роста кристалла. При синтезе использовано железо марки 3N-99,9. Полученные кристаллы при комнатной температуре имели концентрацию дырок 1.2×10^{18} см$^{-3}$.

ДТА-кривая образца получена на приборе Derivatograph (F. Paulik, J. Paulik, L. Erdey), дифрактограммы – при температурах 230, 300, 350 и 420 K на дифрактометре Advance D8 фирмы Bruker. Микроструктура и морфология поверхности образцов GaSb–Fe_3Ga_4 изучены на электронном микроскопе SEM модели Philips с приставкой EDX (model EDAX^{TM}) при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Пондеромоторным методом в интервале температур ~80–750 K и вибрационным методом исследованы температурные зависимости удельной намагниченности эвтектического композита GaSb–Fe_3Ga_4. Намагниченность образцов измерена при направлении магнитного поля перпендикулярно и параллельно металлическим включениям. Погрешность измерения пондеромоторным методом (использована сертифицированная установка) величины удельной намагниченности σ составляет ± 0.05 А м^2 кг, а удельной магнитной восприимчивости χ – $\pm 10^{-11}$ м^3/кг. Термостат установки позволяет изучать зависимости $\chi = f(T)$ и $\sigma = f(T)$ в условиях непрерывного режима измерений без переустановки образца в диапазоне температур от ~80 до 1400 K. Полевые зависимости удельной намагниченности $\sigma = f(B)$ изучены в магнитных полях с индукцией ± 14 Тл при 4.6 и 295 K.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведена ДТА-кривая эвтектического композита GaSb–Fe_3Ga_4. Полученная температура отверждения 963 ± 2 K согласуется с данными [1].

Дифрактограммы образцов при разных температурах приведены на рис. 2. При сравнении полученных дифрактограмм с базовыми данными для GaSb и Fe_3Ga_4 по программе TOPAZ и EVA установлено, что сильные рефлексы соответствуют соединению GaSb с $a = 6.0870$ Å, а слабые принадлежат Fe_3Ga_4 с $a = 10.091$, $b = 7.666$, $c = 7.866$ Å, $\alpha = 90°$, $\beta = 106.66°$, $\gamma = 90°$. Дифрактограммы, полученные при разных температурах, подтверждают, что двухфазность структуры сохраняется и структурные переходы отсутствуют.

Наличие двух фаз в композите GaSb–Fe_3Ga_4 подтверждено и исследованиями микроструктуры (рис. 3). Изображения СЭМ показывают, что включения Fe_3Ga_4 достаточно равномерно рас-

пределены в матрице GaSb и они формируются в виде ориентированных “игл” с поперечными размерами ~1.5 мкм. Длина кристаллитов Fe_3Ga_4 варьируется от 20 до 150 мкм, их плотность ~3.3 × × 10^4 мм$^{-2}$ (рис. 3а и 3б). Следует отметить, что на СЭМ-изображениях поверхности хорошо проявляется присутствие межфазной зоны вокруг включений. Элементные составы матрицы, включений и межфазной зоны представлены на рис. 3в–3д. Содержания галлия и сурьмы в матрице соответствуют стехиометрическому составу GaSb. Установлено, что во включениях кроме железа и галлия наблюдается присутствие сурьмы (около 3.4 мас. %), а в межфазной зоне кроме матричных элементов присутствует около 16.5 мас. % железа.

В магнитном поле с индукцией B = 0.86 Тл в интервале температур ~80–750 K исследованы зависимости удельной намагниченности $\sigma = f(T)$ эвтектического композита GaSb–Fe_3Ga_4 при направлении магнитного поля перпендикулярно и параллельно магнитным включениям (рис. 4а). В разных направлениях магнитного поля по отношению к металлическим включениям зависимости $\sigma = f(T)$ идентичны. Этот результат позволяет сделать вывод об отсутствии анизотропии в зависимости от направления внешнего магнитного поля. Удельная намагниченность практически линейно уменьшается от 1.5 до 0.2 Ам^2/кг. При нагреве и охлаждении на зависимостях $\sigma = f(T)$ гистерезис не наблюдается, что указывает на обратимость магнитных свойств исследуемого эвтектического композита в указанном интервале температур.

На вставке к рис. 4б приведена зависимость $\sigma^2 = f(T)$, которая позволяет наиболее корректно определить температуру Кюри (T_C). Для классических ферромагнетиков триады железа Fe, Co, Ni зависимость $\sigma^2 = f(T)$ демонстрирует один четкий излом и два прямолинейных участка. Зависимость $\sigma^2 = f(T)$ GaSb–Fe_3Ga_4 содержит две аномалии: при T_1 = 230 K и T_2 = 355 K. Очевидно, что область 80 K $\le T \le T_1$ – это интервал устойчивого существования дальнего магнитного упорядочения, а область $T_2 \le T <$ 750 K характеризуется ближним магнитным порядком и парамагнитным состоянием. Интервал температур $T_1 \le T \le T_C$, вероятнее всего, – это температурная область перехода к проявлению ближнего магнитного упорядочения. Наличие протяженного по температуре фазового перехода магнитный порядок–магнитный беспорядок через сохранение ближнего магнитного упорядочения указывает на фазовое превращение 2-го рода. Вероятнее всего, T_2 и является температурой Кюри исследуемого образца (T_2 = = T_C = 355 K). Таким образом, установлено, что в исследуемом эвтектическом композите GaSb–Fe_3Ga_4 переход магнитный порядок–магнитный беспорядок происходит при T_C = 355 K.

Ранее установлено, что Fe_3Ga_4 обладает двумя магнитными фазовыми превращениями: ферромагнетик (**ФМ**)–антиферромагнетик (**АФМ**) при 68 K, АФМ–парамагнетик (**ПМ**) при ~360 K [19, 20, 22–24]. В интервале промежуточных температур выявлены конкурирующие обменные взаимодействия между АФМ- и ФМ-состояниями. В работе [20] показано, что это обусловлено особенностями кристаллической структуры Fe_3Ga_4. Элементарная ячейка Fe_3Ga_4 содержит восемнадцать атомов железа, занимающих четыре неэквивалентных положения с различными магнитными моментами и свойствами носителей заряда. Установлено, что на магнитные характеристики заметное влияние оказывают условия отжига образца Fe_3Ga_4. Кристаллическая неупорядоченность определяет особенности сосуществования ФМ- и АФМ-состояний [20].

Влияние размерности на магнитные свойства соединения Fe_3Ga_4 изучено в работах [21, 22]. Показано, что, как и в объемных кристаллах, в нанопроволоках также обнаружены два магнитных фазовых превращения и сосуществование ФМ- и АФМ-фаз. Критическая температура T_C = 392 K определена при исследовании особенностей проявления эффекта Мессбауэра на ядрах ^{57}Fe в матрице Fe_3Ga_4. Наблюдаемая нами температура магнитного фазового перехода при 355 K в GaSb–Fe_3Ga_4 (рис. 4) близка к температуре перехода АФМ–ПМ в соединении Fe_3Ga_4 [19]. Результаты изучения магнитных характеристик соединения Fe_3Ga_4 находятся в хорошем согласии с данными [19, 24] и могут быть интерпретированы с использованием модели Mariya и Usami [25] для магнитных фазовых переходов в электронных системах при отсутствии магнитной анизотропии. Результаты изучения удельной намагниченности эвтектического композита GaSb–Fe_3Ga_4, представленные на рис. 4а, также указывают на отсутствие магнитной анизотропии.

В модели Mariya и Usami энергия обменных взаимодействий электронов как функция температуры изменения магнитной восприимчивости ферромагнитной (M_0) и антиферромагнитной (M_Q) составляющих при отсутствии магнитной анизотропии определяется соотношением

$$F(M_0, M_Q, T) = \frac{1}{2\chi_0} M_0^2 + \frac{1}{2\chi_0} M_Q^2 + \frac{1}{4}\gamma_U M_0^4 + \\ + \frac{1}{4}\gamma_S M_Q^4 + \frac{1}{2}\gamma_{US}^0 M_0^2 M_Q^2 + \frac{1}{2}\tilde{\gamma}_{US}^Q M_0^2 M_Q^2 - H_0 M_0,$$

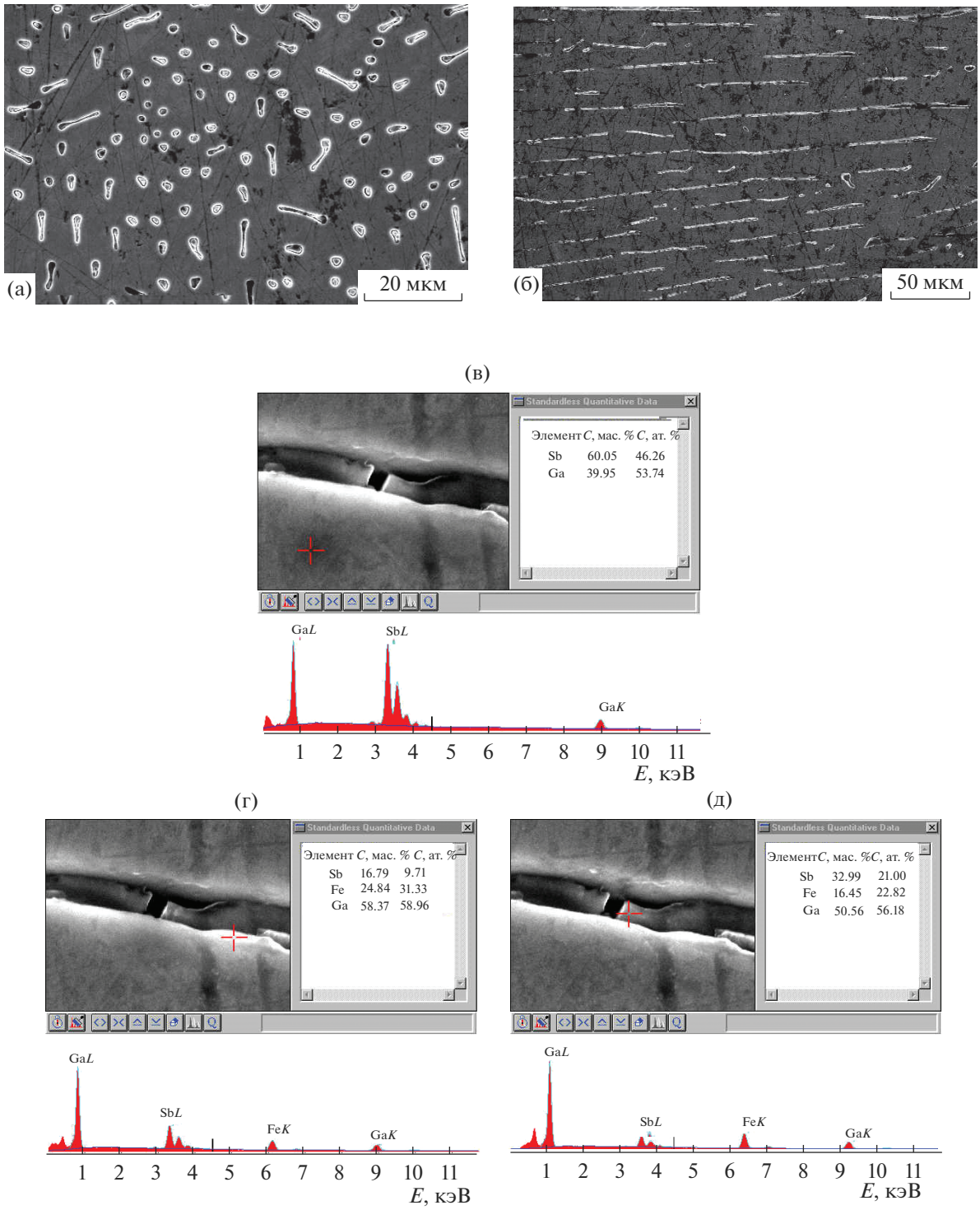

Рис. 3. Распределение металлических включений при поперечном (а) и параллельном (б) разрезах, элементный состав матрицы (в), включений (г) и межфазной зоны (д), наблюдаемые при EDX-анализе.

где $\frac{1}{\chi_0} = \left(\frac{1}{\chi_0^0}\right) - 1 + \left(\partial^2 \Delta F / \partial M_{0Z}^2\right)$, $\frac{1}{\chi_Q} = \left(\frac{1}{\chi_Q^0}\right) - 1 + \left(\partial^2 \Delta F / \partial M_{Qx}^2\right)$,

H_0 – напряженность однородного внешнего магнитного поля; коэффициенты χ_0^0, χ_Q^0, γ_U^0, γ_{US}^0, $\tilde{\gamma}_{US}^Q$ рассчитываются для заданной зонной структуры с использованием метода аппроксимации вычис-

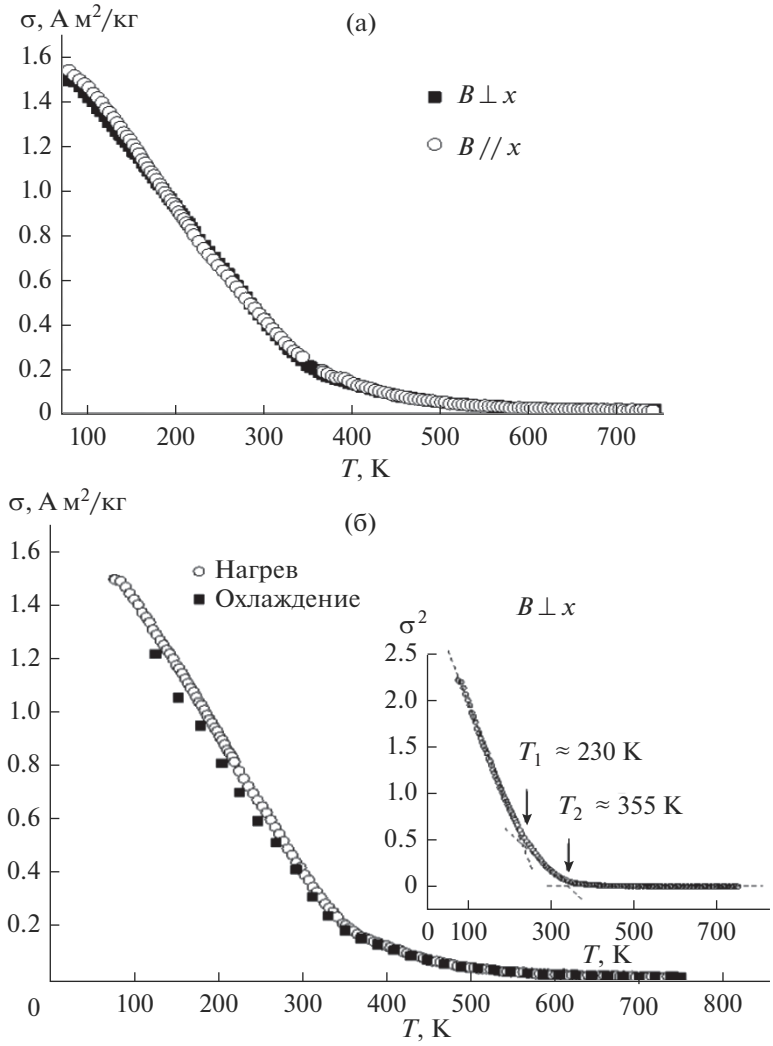

Рис. 4. Температурные зависимости удельной намагниченности GaSb–Fe_3Ga_4 при направлении магнитного поля перпендикулярно и параллельно металлическим включениям (а) и зависимости $\sigma = f(T)$ при нагреве и охлаждении в интервале 80–750 K при $B \perp x$ (б).

ленных сил обменных взаимодействий ΔF и динамических магнитных восприимчивостей самосогласованным образом в случае слабых ферро- и антиферромагнитных обменных взаимодействий.

Расчет величины магнитной восприимчивости для случая слабых магнитных обменных взаимодействий, выявленных в эвтектическом композите GaSb–Fe_3Ga_4 при отсутствии анизотропии, дает значение $\chi \sim 2.3 \times 10^{-4}$. Магнитная восприимчивость при 80 K, измеренная пондеромоторным методом в статическом магнитном поле с индукцией $B = 0.86$ Тл имеет величину $\chi = 1.9 \times 10^{-4}$ (рис. 5). Рассчитанная и измеренная величины магнитной восприимчивости одного порядка. На вставке к рис. 5 приведена зависимость обратной величины магнитной восприимчивости от температуры $\frac{10^{-2}}{\chi} = f(T)$. Зависимость $\frac{10^{-2}}{\chi(T)}$ убедительно демонстрирует T_3 как температуру завершения существования ближнего магнитного порядка и полный переход к магнитному беспорядку. Выше $T_3 \approx 650$ K изменение восприимчивости подчинено линейной функции (вставка к рис. 5). Проекции на ось T прямолинейных участков зависимости $\frac{10^{-2}}{\chi} = f(T)$ находятся в области положительных значений температур, что косвенным образом указывает на ферромагнитную природу обменных взаимодействий в GaSb–Fe_3Ga_4 с удельной намагниченностью $\sigma = 1.5$ А м²/кг при 80 K. Средний магнитный момент прямо пропорционален произведению удельной намагничен-

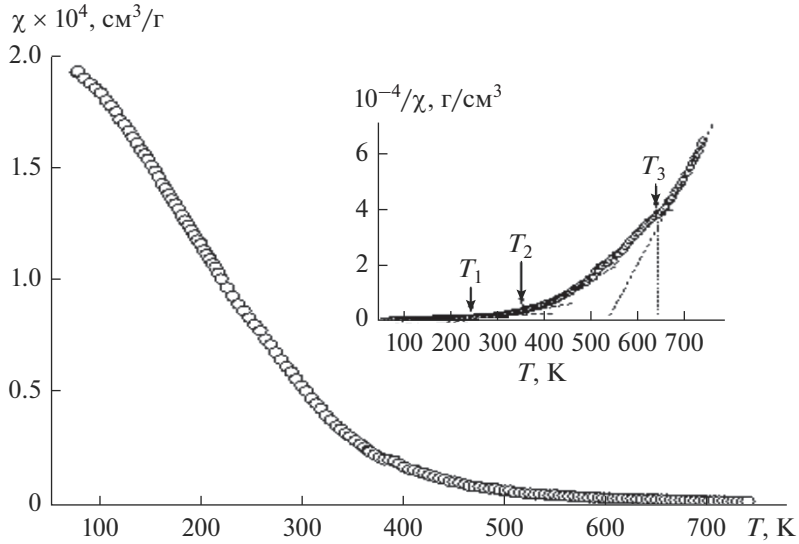

Рис. 5. Температурная зависимость $\chi = f(T)$ удельной магнитной восприимчивости композита GaSb–Fe_3Ga_4 в интервале 80–750 K; на вставке – зависимость $1/\chi(T)$.

ности на молекулярную массу образца и обратно пропорционален произведению числа Авогадро на величину магнетона Бора [26]. Усредненная величина магнитного момента исследуемого образца в единицах магнетона Бора рассчитана с использованием соотношения

$$\mu = \frac{\sigma m}{N_A \mu_B},$$

где N_A – число Авогадро, μ_B – величина магнетона Бора, σ – удельная намагниченность, m – молекулярная масса формульной единицы состава. Вблизи температуры жидкого азота величина среднего магнитного момента исследуемого эвтектического композита $\mu = 0.17\mu_B$. При нагревании до 300 K величина среднего магнитного момента уменьшается до $\mu = 0.05\mu_B$. В диапазоне температур проявления ближнего магнитного порядка $360 < T \leq 650$ K удельная намагниченность уменьшается от 0.19 до 0.02 А м^2/кг, а магнитная восприимчивость χ – от ~3.1×10^{-5} до ~2.4×10^{-6}.

Ближний магнитный порядок может быть следствием проявления деформации кристаллической структуры. Сохранение ближнего магнитного порядка в интервале $360 \leq T \leq 650$ K, вероятнее всего, обусловлено присутствием в GaSb–Fe_3Ga_4 магнитных кластеров.

Известно, что при образовании эвтектического композита в зависимости от величины потенциала взаимодействия и несоразмерности кристаллических решеток фаз на их границе создаются протяженные дефекты-дислокации, на которых возможно накопление атомов примеси [27]. Это приводит к образованию кластеров и возникновению межфазной зоны. В эвтектическом композите GaSb–Fe_3Ga_4 выявлено наличие межфазной зоны, а также присутствие в ней атомов железа. Убедительно это демонстрируют результаты EDX-анализа (рис. 3). Влияние межфазной зоны на электронный транспорт в GaSb–Fe_3Ga_4 существенно [7]. Ближний магнитный порядок в интервале $230 \leq T \leq 355$ K может быть обусловлен и присутствием только межфазной зоны с магнитным упорядочением. Отсутствие магнитного насыщения на зависимостях $\sigma = f(B)$ подтверждает предположение о наличии магнетизма кластерного типа. Небольшие величины удельной намагниченности ($0.2 \leq \sigma \leq 0.74$ А м^2/кг) в интервале температур $230 \leq T \leq 355$ K, по-видимому, обусловлены сочетанием слабых обменных магнитных взаимодействий матрицы GaSb, включений Fe_3Ga_4 и межфазной зоны. Изучение особенностей на зависимостях удельной намагниченности $\sigma = f(B)$ в магнитных полях с индукцией до ±14 Тл при температурах 4.6 и 295 K показало отсутствие хорошо выраженной петли магнитного гистерезиса (рис. 6), а также что эвтектический композит GaSb–Fe_3Ga_4 легко перемагничивается, обладая небольшой величиной удельной намагниченности.

Результаты, полученные при изучении магнитных характеристик, позволяют сделать предположение о перспективности применения эвтектического композита GaSb–Fe_3Ga_4 в устройствах PCM (Phase change memory).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В интервале температур ~80–750K и магнитных полях с индукцией $B = \pm 14$ Тл в режиме на-

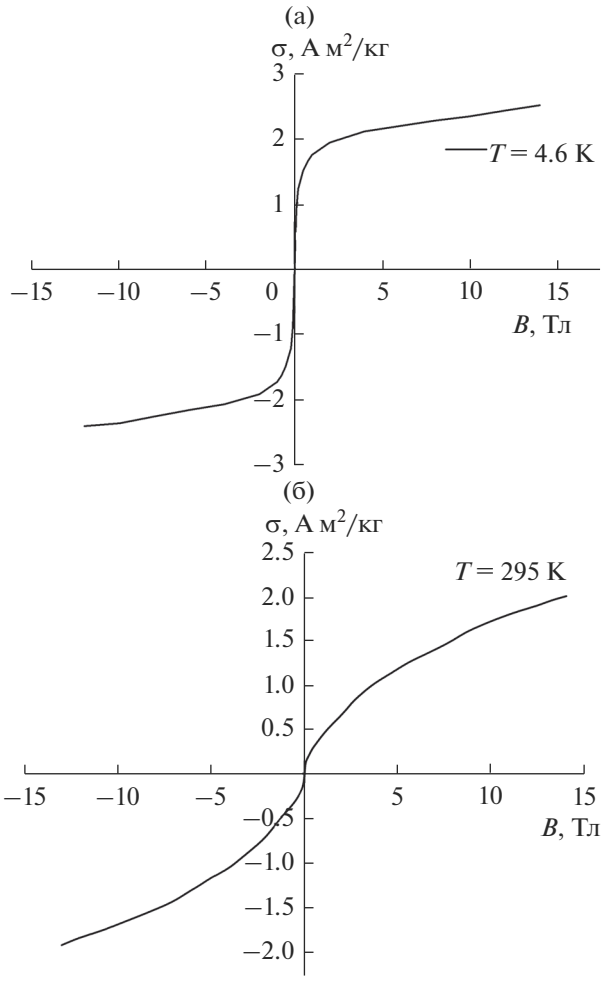

Рис. 6. Полевые зависимости удельной намагниченности $\sigma = f(B)$ эвтектического композита GaSb–Fe_3Ga_4 в магнитных полях с индукцией до ±14 Тл при 4.6 (а) и 295 K (б).

грев–охлаждение измерены удельная намагниченность $\sigma = f(T)$ и магнитная восприимчивость $\chi = f(T)$ эвтектического композита GaSb–Fe_3Ga_4 при изменении температуры с шагом $\Delta T \approx 5$ K.

Установлено, что фундаментальные магнитные характеристики исследуемого композита устойчивы к тепловым нагрузкам до 750 K и не зависят от направления воздействия внешнего магнитного поля. Выявлено, что GaSb–Fe_3Ga_4 обладает свойствами ферромагнетика с магнитным моментом $\mu = 0.17\mu_B$ при температуре 80 K. Показано, что в интервале 355–~650 K сохраняется ближнее магнитное упорядочение.

Вывод о наличии слабых обменных взаимодействий подтвержден измерениями пондеромоторным методом в статическом магнитном поле и путем расчета величины магнитной восприимчивости с использованием модели Mariya–Usami.

Выявлено существование магнитных кластеров, благодаря которым ближний магнитный порядок в исследуемом эвтектическом композите сохраняется до температуры ~650 K. Наличие магнитной составляющей, обусловленной магнетизмом кластеров, подтверждено измерениями полевых зависимостей $\sigma = f(B)$ при отсутствии явления насыщения намагниченности при увеличении магнитного поля от 0 до 14 Тл.

Анализ полевых зависимостей удельной намагниченности позволяет отнести GaSb–Fe_3Ga_4 к магнитомягкому, без магнитной анизотропии, быстро перемагничиваемому материалу, пригодному для использования в матрицах устройств микроэлектроники.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ проекта Т18Az-029 и Программой ГПНИ РБ на 2016–2020 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Muller A., Wilhem M.* Über Den Gerichteten Einbau Von Schwermetall Phasen in $A^{III}B^{V}$ – Verbindungen: Die Eutektika GaSb–CrSb, GaSb–$FeGa_{1.3}$, GaSb–$CoGa_{1.3}$, InAs–CrAs und InAs–FeAs // J. Phys. Chem. Solids. 1965. V. 26. № 12. P. 2029–2035. https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-physics-and-chemistry-of-solids/vol/26/issue/12
2. *Wagini H., Wilhelm M.* Magnetische und Electrische Messungen of System InSb-Mn // Z. Naturforsch, A. 1966. V. 21. № 4. P. 329–333. http://zfn.mpdl.mpg.de/data/Reihe_A/21/ZNA-1966-21a-0329.pdf
3. *Uher C., Goldsmid H.J.* A Comparision of Thermomagnetic Materials For Use of Room Temperature // J. Phys. D: Appl. Phys. 1972. V. 5. № 8. P. 1478–1488. http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/5/8/318/meta
4. *Алиев М.И., Абдинова С.Г., Алиев С.А.* Кинетические явления в эвтектическом сплаве // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. 1974. Т. 10. № 5. С. 823–826.
5. *Алиев М.И., Араслы Д.Г., Гусейнов Р.Э., Джаббаров Р.М.* Тепло- и температуропроводность эвтектик на основе InSb–MnSb // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. 1979. Т. 15. № 8. С. 1320–1323.
6. *Алиев М.И., Дадашов П.Ш., Сафаралиев Г.И.* Исследование кинетических свойств сплавов $Ga_{1-x}Mn_xSb$ в интервале 80–1000 K // ФММ. 1980. Т. 49. № 5. С. 1093–1095.
7. *Мамедов И.Х., Араслы Д.Г., Халилова А.А., Рагимов Р.Н.* Анизотропия электрических свойств эвтектического композита InSb + MnSb // Неорган. материалы. 2016. Т. 52. № 4. С. 468–472. https://doi.org/10.7868/S0002337X16040102
8. *Aliyev M.I., Khalilova A.A., Arasly D.H., Rahimov R.N., Tanoglu M., Ozyuzer L.* Features of Electron and Phonon Processes in GaSb-$FeGa_{1.3}$ // J. Phys. D: Appl.

Phys. 2003. V. 36. P. 2627–2633.
https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/21/005

9. *Mamedov I.Kh., Ragimov R.N., Khalilova A.A., Arasly D.G., Aliev M.I.* Influence of Doping on the Microstructure and Kinetic Parameters of GaSb–$FeGa_{1.3}$ Eutectics // Crystallogr. Rep. 2012. V. 57 № 7. P. 923–926.
https://doi.org/10.1134/S106377451207019X

10. *Rahimov R.N., Khalilova A.A., Arasly D.H., Aliyev M.I., Tanoglu M., Ozyuzer L.* Thermostable Tensoresistors of Co Doped GaSb- $FeGa_{1.3}$ Eutectic Composites // Sens. Actuators, A. 2008. V. 147. P. 436–440.
https://doi:10.1016j.sna.2008.05.032

11. *Рагимов Р.Н., Мамедов И.Х., Араслы Д.Г., Халилова А.А. Джаббаров Р.М.* Детектор теплового излучения на основе эвтектики InSb–FeSb // Прикладная физика. 2006. № 5. С. 86–89.

12. *Aliyev M.I., Khalilova A.A., Arasly D.H., Rahimov R.N., Tanoglu M., Ozyuzer L.* Strain Gauges of GaSb–$FeGa_{1.3}$ Eutectic Composites // Appl. Phys. A. 2004. V. 79. № 8. P. 2075–2079.
https://doi:10.1007s00339-004-2870-0

13. *Маренкин С.Ф., Кочура А.В., Федорченко И.В., Дрогунов С.В., Изотов А.Д., Васильев М.Г., Трухин В.М., Шелковая Т.В., Новодворский О.А., Желудкевич А.Л.* Выращивание эвтектических композиций в системе InSb–MnSb // Неорган. материалы. 2016. Т. 52. № 3. С. 309–314.

14. *Дмитриев А.И., Кочура А.В., Кузьменко А.П., Паршина Л.С., Новодворский О.А., Храмова О.Д., Кочура Е.П., Васильев А.Л., Аронзон Б.Ф.* Влияние термообработки на дисперсию магнитной анизотропии нановключений MnSb, внедренных в тонкие пленки GaMnSb // ФТТ. 2019. Т. 61. № 4. С. 652–658.

15. *Иванов В.А., Аминов Т.Г., Новоторцев В.М., Калинников В.Т.* Спинтроника и спинтронные материалы // Изв. РАН. Сер. Химия. 2004. № 11. С. 2255–2303.

16. *Таланцев А.Д., Колпак О.В., Моргунов Р.Б.* Ферромагнетизм и микроволновое магнитосопротивление пленок GaMnSb // ФТТ. 2015. Т. 57. № 2. С. 307–315.

17. *Новоторцев В.М., Кочура А.В., Маренкин С.Ф., Федорченко И.В., Дорогунов С.В., Lashkul A., Lahderanta E.I.* Синтез и магнитные свойства эвтектики системы InSb-MnSb // Журн. неорган. химии. 2011. Т. 56. № 12. С. 2038–2044.

18. *Nilsen T.A., Breivik M., Myrvågnes G., Fimland B.* Thermal Expansion of GaSb Measured by Temperature Dependent X-ray Diffraction // J. Vac. Sci. Technol. B, 2010. V. 28. P. 3I17–3120.
https://doi.org/10.1116/1.3336341

19. *Kawamiya N., Adachi K.* Magneting and Mössbauer Studies of Metamagnetic Fe_3Ga_4 // J. Phys. Soc. Jpn. 1986. V. 55. P. 634–640.
https://doi.org/10.1143/JPSJ.55.634

20. *Moura K.O., Oliveira L.A.S.de, Rosa P.F.S., Jesus C.B.R., Saleta M.E., Granado E., Beron F., Paglinso P.G., Pirota K.R.* Dimensionality Tuning of the Electronic Structure in Fe_3Ga_4 Magnetic Materials // Sci. Rep. 2016. 6:28364.
https://doi.org/10.1038/srep28364

21. *Mendez J.H., Ekuma C.E., Wu Y., Fulfer B.W., Prestigiacomo J.C., Shelton W.A., Jarrelly M., Moreno J., Young D.P., Adams P.W., Karki A., Jin R., Julia Y.* Competing Magnetic States, Disorder and the Magnetic Character of Fe_3Ga_4 // Phys. Rev. B. 2015. V. 91. P. 144409(1–12).
https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.144409

22. *Wagini H.* Magnetische, Elektrische und Thermische Eigenschaften der bcc-a-Phase im System Fe–Ga // Z. Naturforsch., A. 1967. V. 22. P. 143–144.
https://doi.org/10.1515/zna-1967-0125

23. *Duijn H.G.M., Brück E., Buschow K.H.J., de Boer F.R., Waals Van der, Prokeš K., Sechovský K.* Pressure Dependence of the Ferromagnetic to Antiferromagnetic Transition in $Fe_3(Ga_{1-x}Al_x)_4$ with $x = 0.0$ and 0.1 // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. P. 4738–4740.
https://doi.org/10.1063/1.370465

24. *Kawamiya N., Adachi K.* Magneting Phase Change in $(Fe_{1-x}Co_x)_3Ga_4$ // J. Magn. Magn. Mater. 1986. V. 54. P. 941–945.
https://doi.org/10.1016/0304-8853(86)90324-0

25. *Moriya T., Usami K.* Coexistence of Ferro- and Antiferromagnetism and Phase Transitions in Itinerant Electron Systems // Solid State Commun. 1977. V. 23. P. 935–938.
https://doi.org/10.1016/0038-1098(77)90719-0

26. *Lotgering P.K., Gorter E.W.* Solid Solutionbetween Ferromagnetic and Antiferromagnetic Compounds with NiAs Structure // J. Phys. Chem. Solids. 1957. V. 3. P. 238–249.
https://doi.org/10.1016/0022-3697(57)90028-8

27. *Саныгин В.П., Изотов А.Д., Пашкова О.Н.* Дислокационный магнетизм полупроводника GaSb⟨Mn⟩ // Неорган. материалы. 2019. Т. 55. С. 946–951.