

## ЭЛЕКТРОННЫЕ СТРУКТУРА И СВОЙСТВА

PACS numbers: 61.05.fm, 64.60.Cn, 64.75.Op, 72.15.Eb, 75.25.-j, 75.30.Kz, 75.50.Bb

### Структура та магнетні властивості стопу $\text{Fe}_2\text{MnGa}$

Ю. В. Кудрявцев, А. О. Перекос, В. М. Єрмоленко, J. Dubowik\*,  
І. М. Главацький\*\*, Л. Є. Козлова\*\*\*, Ю. Б. Скірта\*\*\*

*Институт металлофизики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,  
бульв. Акад. Вернадського, 36,  
03680, МСП, Київ-142, Україна*

*\*Институт молекулярной физики ПАН,  
вул. Смолуховського, 17,  
60-179 Познань, Польща*

*\*\*Гельмгольц-Центр матеріалів та енергії в Берліні,  
пл. Ган-Майтнер, 1,  
14109 Берлін, Німеччина*

*\*\*\*Институт магнетизму НАН України,  
бульв. Акад. Вернадського, 36<sup>а</sup>,  
03680, МСП, Київ-142, Україна*

Магнетні властивості стопу  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  в зв'язку з його кристалічною структурою вивчали в інтервалі температур 4–850 К методами дифракції нейтронів (ДН) та магнетометрії. Встановлено, що після відпалу за температури у 1020 К впродовж 96 годин з наступним гартуванням у крижаній воді стоп містить впорядковані фази зі структурами  $L1_2$  та  $L2_1$ . Стоп  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  характеризується складною температурною залежністю магнетних властивостей, яка обумовлена перетвореннями (при нагріві) з ферромагнетного (ФМ) у парамагнетний стан у фазі  $L2_1$  і з антиферромагнетного (АФМ) стану в ФМ у фазі  $L1_2$ . Згідно з даними ДН, АФМ-порядок у стопі не є строго антипаралельним. Відсутність значної обмінної анізотропії у стопі зумовлено хаотичною орієнтацією магнетних моментів зерен ФМ-фази, що межують з областями АФМ-фази.

Магнитные свойства сплава  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  в связи с его кристаллической структурой исследовали в интервале температур 4–850 К методами дифракции нейтронов (ДН) и магнитометрии. Установлено, что после отжига при температуре 1020 К в течение 96 часов с последующей закалкой в ледяной воде сплав содержит упорядоченные фазы со структурами  $L1_2$  и  $L2_1$ . Сплав  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  характеризуется сложной температурной зависимостью магнитных свойств, которая обусловлена превращениями (при нагреве) из ферромагнитного (ФМ) в парамагнитное состояние в фазе

$L2_1$  и из антиферромагнитного (АФМ) состояния в ФМ в фазе  $L1_2$ . По данным ДН, АФМ-порядок в сплаве не является строго антипараллельным. Отсутствие значительной обменной анизотропии в сплаве обусловлено хаотической ориентацией магнитных моментов зёрен ФМ-фазы, граничащих с областями АФМ-фазы.

Magnetic properties of  $\text{Fe}_{50.1}\text{Mn}_{22.7}\text{Ga}_{27.2}$  alloy in connection with its atomic structure are investigated in temperature range of 4–850 K by using neutron diffraction (ND) and magnetometry. As revealed, the annealed (at 1020 K during 96 hours) and quenched (in ice water) alloy contains ordered phases of superstructural  $L1_2$  and  $L2_1$  types. The  $\text{Fe}_{50.1}\text{Mn}_{22.7}\text{Ga}_{27.2}$  alloy exhibits complicated temperature dependence of magnetic properties determined by the ferromagnetic (FM)-to-paramagnetic transformation (under heating) in  $L2_1$  phase and transformation from the antiferromagnetic (AFM) state to the FM one in  $L1_2$  phase. As revealed with ND data, the AFM order in  $L1_2$  phase is not strongly antiparallel. Absence of significant exchange anisotropy in the alloy can be explained by the random orientation of magnetic moments of the FM-phase grains, which are adjacent to the AFM-phase regions.

**Ключові слова:** метамагнетне перетворення, мартенситне перетворення, магнетні властивості, обмінна анизотропія, дифракція нейтронів.

*(Отримано 23 квітня 2014 р.; остаточн. варіант — 30 червня 2014 р.)*

## 1. ВСТУП

Значний інтерес до стехіометричних та нестехіометричних стопів  $\text{Fe}_2\text{MnGa}$  обумовлено відкриттям у цих стопів властивостей, що можуть знайти практичне застосування, а саме, значної обмінної анизотропії [1–3], метамагнетного фазового перетворення з антиферромагнетної (АФМ) фази в ферромагнетну (ФМ) [1–4], мартенситного перетворення [5–9]. Танг та ін. запропонували керувати величиною обмінної анизотропії в нестехіометричних однофазних (ГЦК) стрічках стопу  $\text{Fe-Mn-Ga}$ , що були одержані гартуванням з рідкої фази, шляхом термомагнетного оброблення стрічок, яке викликало зміну вмісту АФМ- та ФМ-фаз в стопі при метамагнетному перетворенні [2]. В той же час відомо, що стоп  $\text{Fe}_2\text{MnGa}$ , композиція якого незначно відрізняється від стехіометричної, може бути як двофазним і містити ГЦК (АФМ при низьких температурах та незначних зовнішніх магнетних полях) та ОЦК (ферромагнетну при  $T < 190$  К) фази, так може містити і лише ОЦК-фазу [4, 5, 10]. Таким чином, для двофазних стопів  $\text{Fe}_2\text{MnGa}$  можна очікувати ускладнені магнетні властивості, які виявляють риси обох фаз. Це, в свою чергу, відкриває перспективи формування в стопах значної обмінної магнетної анизотропії.

Подібну до метамагнетних матеріалів температурну залежність намагнетованості (тобто зростання намагнетованості при темпера-

турі АФМ–ФМ-перетворення) можна також спостерігати для спінових стекел. Висновок про формування саме АФМ-порядку в розупорядкованому стопі  $\text{Fe}_2\text{MnGa}$  було зроблено авторами робіт [1, 2] на підставі аналізу характеру польових залежностей намагнетованості стопів  $M(H)$ , одержаних при різних температурах після різноманітних термомагнетних обробок стопу. Однак відомостей про тип АФМ-порядку в стопі (якщо він там існує) не було наведено.

Згідно з результатами роботи Жу та ін., ОЦК-фаза в стопі  $\text{Fe}_{50,0}\text{Mn}_{22,5}\text{Ga}_{27,5}$  при кімнатній температурі (КТ) не є феромагнетно впорядкованою, а поява ФМ порядку обумовлена мартенситним перетворенням у тетрагональну фазу, яке має місце при  $T = 150$  К [5]. На відміну від Жу, Шіх та ін. стверджували, що фольги стопу  $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{24}\text{Ga}_{26}$ , одержані шляхом гартування з рідкої фази, є двофазними (ГЦК + ОЦК), не демонструють мартенситного перетворення, а ОЦК-фаза має температуру Кюрі  $T_c = 190$  К [4]. Таким чином, питання «Чи є феромагнетизм ОЦК-фази стопу  $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{24}\text{Ga}_{26}$  його притаманною властивістю, чи його поява є наслідком мартенситного перетворення в тетрагональну фазу?» є відкритим питанням.

Робота має на меті дослідження магнетних властивостей майже стехіометричного стопу  $\text{Fe}_2\text{MnGa}$  в зв'язку з його структурою за допомогою переважно пружного розсіяння нейтронів у широкій області температур та магнетних полів.

## 2. ДЕТАЛІ ЕКСПЕРИМЕНТУ

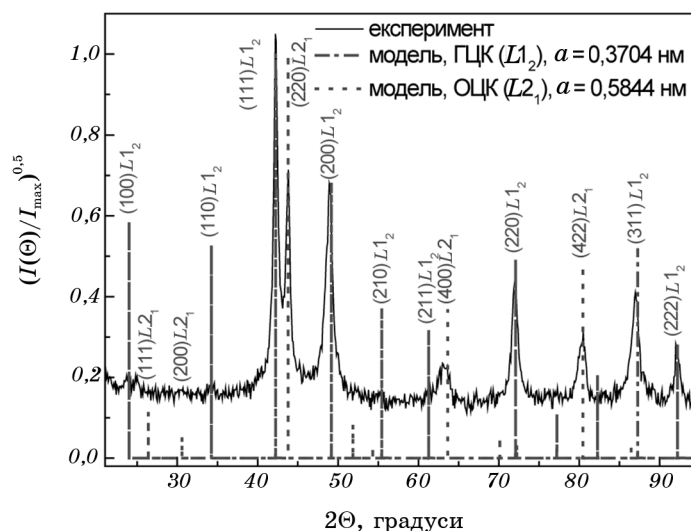
Ступ  $\text{Fe}_2\text{MnGa}$  було виготовлено шляхом електродугового топлення відповідних кількостей Fe, Mn та Ga, чистота яких складала 99,99%, в охолоджуваній водою мідній подіні в атмосфері аргону при тиску  $1,3 \cdot 10^5$  Па. Перед топленням стопу газ Ar додатково очищували шляхом багаторазового перетоплення стопу  $\text{Ti}_{0,50}\text{Zr}_{0,50}$ , який виконував роль гетера. Для здобуття об'ємної однорідності стопу зливок було перетоплено 5 разів. Реальний склад стопу, визначений методом Рентгенової флуоресценції, становив  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$ . Зливок стопу було відпалено при температурі  $T_{\text{відп}} = 1020$  К протягом 96 годин і потім загартовано від цієї температури в крижану воду. Структуру стопу вивчали при КТ за допомогою Рентгенової  $\Theta$ – $2\Theta$ -дифракції з використанням  $\text{CuK}_\alpha$ -випромінення. Додатково атомну та магнетну структури стопу  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  вивчали при  $T = 100, 300$  та  $580$  К (тобто в різних магнетних станах стопу) в магнетних полях  $H = 0$  Тл та  $5$  Тл за допомогою методу дифракції нейтронів (ДН) у Гельмгольц-Центрі в Берліні, з використанням дифрактометра E2 з монохроматором PG (002), який продукує монохроматичний потік неполяризованих нейтронів з довжиною хвилі  $\lambda = 0,239$  нм. Через те, що для кріплення зразків використовували контейнер з алюмінію, в спектрах ДН

могли бути присутніми рефлекси, що відносяться до Al. Магнетні властивості стопу  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  вивчали за допомогою магнетометра PPMS-14T Quantum Design в інтервалі температур  $2 \text{ K} < T < 350 \text{ K}$  в магнетних полях  $H = 0 \text{ Тл}$  та  $H = 5 \text{ Тл}$  (намагнетованість) та в температурному інтервалі  $80 < T < 830 \text{ K}$  (магнетну сприйнятливність при постійному струмі).

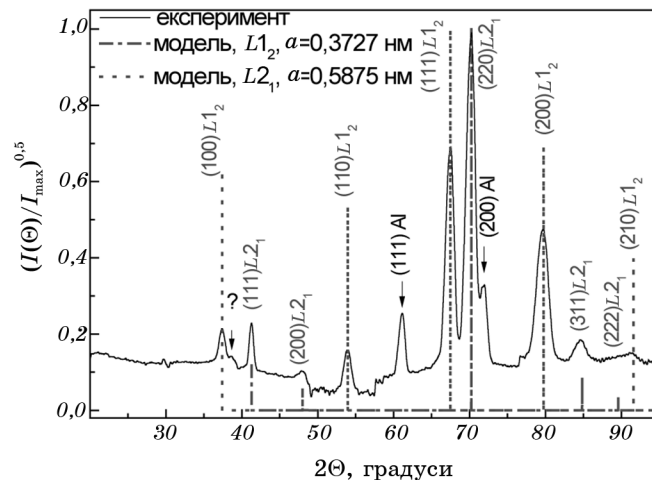
### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Згідно з результатами дослідження структури за допомогою методу Рентгенівської дифракції, в стопі  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  присутні впорядкована фаза ГЦК-типу (про що свідчить присутність надструктурних рефлексів (100) та (110)) зі сталою кристалічної ґратниці  $a = 0,3703 \text{ нм}$  та ОЦК-фаза зі сталою кристалічної ґратниці  $a = 0,5844 \text{ нм}$  (див. рис. 1). Вміст ГЦК- та ОЦК-фаз у стопі, оцінений за співвідношенням величин найбільш інтенсивних ліній, складає 70,6% проти 29,4% відповідно.

На відміну від спектра Рентгенової дифракції спектр ДН, одержаний в подібних умовах, виглядає більш інформативним (див. рис. 2). Так, стоп  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  крім впорядкованої ГЦК-фази типу  $L1_2$  (про що свідчать надструктурні лінії (100), (110) та (210)) з параметром кристалічної ґратниці  $a = 0,3720 \text{ нм}$  містить також впорядковану фазу  $L2_1$  (рефлекси (111) та (311) задовольняють умові, що всі індекси  $h, k, l$  є непарними) зі сталою кристалічної ґратниці



**Рис. 1.** Експериментальний та модельні спектри Рентгенової дифракції для стопу  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$ .



**Рис. 2.** Експериментальний та модельні спектри ДН для стопу  $\text{Fe}_{50.1}\text{Mn}_{22.7}\text{Ga}_{27.2}$ , що були одержані при  $T = 300 \text{ К}$  та  $H = 0 \text{ Тл}$ .

$a = 0,5875 \text{ нм}$ . Рефлекси при  $2\Theta = 61,2$  та  $71,9^\circ$  можна впевнено віднести до (111) та (200) піків алюмінію, в той же час рефлекс при  $2\Theta = 38,8^\circ$  важко ідентифікувати. Співіснування двох фаз у майже стехіометричному стопі  $\text{Fe}_{50.1}\text{Mn}_{22.7}\text{Ga}_{27.2}$  узгоджується з нашими попередніми даними: згідно з результатами *ab initio* розрахунків, впорядкована  $L2_1$ -фаза з феримагнетним типом магнетного порядку ( $\mu_{L2_1} = 2,036\mu_{\text{Б}}/\text{ф.о.}$  (ф.о. — формульна одиниця),  $\mu_{\text{Fe}} = -0,233\mu_{\text{Б}}$ ,  $\mu_{\text{Mn}} = +2,483\mu_{\text{Б}}$ ,  $\mu_{\text{Ga}} = -0,005\mu_{\text{Б}}$ ) та  $L1_2$  з феромагнетним типом магнетного порядку ( $\mu_{L1_2} = 6,11\mu_{\text{Б}}/\text{ф.о.}$ ,  $\mu_{\text{Fe}} = +1,99\mu_{\text{Б}}$ ,  $\mu_{\text{Mn}} = +2,29\mu_{\text{Б}}$ ,  $\mu_{\text{Ga}} = -0,09\mu_{\text{Б}}$ ) в стопі  $\text{Fe}_2\text{MnGa}$  мають майже однакові імовірності бути сформованими через неістотну різницю між повними енергіями цих фаз:  $\Delta E = 60 \text{ меВ}$ . Співіснування ОЦК-матриці зі слідами ГЦК-фази в деяких нестехіометричних стопах  $\text{Fe}_2\text{MnGa}$  відзначалося Жу та ін. для досить значної області композицій [5]. В той же час у стопі  $\text{Fe}_{50,0}\text{Mn}_{22,5}\text{Ga}_{27,5}$ , склад і термообробка котрого практично повністю збігалася з дослідженим у даній роботі стопом  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$ , присутня лише ОЦК-фаза [5].

Вплив температури та зовнішнього магнетного поля на спектри ДН наведено на рис. 3.

Для того, щоб зрозуміти вплив температури та магнетного поля на спектри пружної дифракції нейтронів, бажано мати уявлення про магнетні властивості стопу. На рисунках 4 і 5 наведено результати дослідження магнетних властивостей стопу  $\text{Fe}_{50.1}\text{Mn}_{22.7}\text{Ga}_{27.2}$ . Температурна залежність магнетної сприйнятливості підтверджує двофазну структуру стопу: різке зменшення величини магнетної сприйнятливості  $\chi$  при  $T > 200 \text{ К}$  (при нагріві стопу) пов'язане з пе-

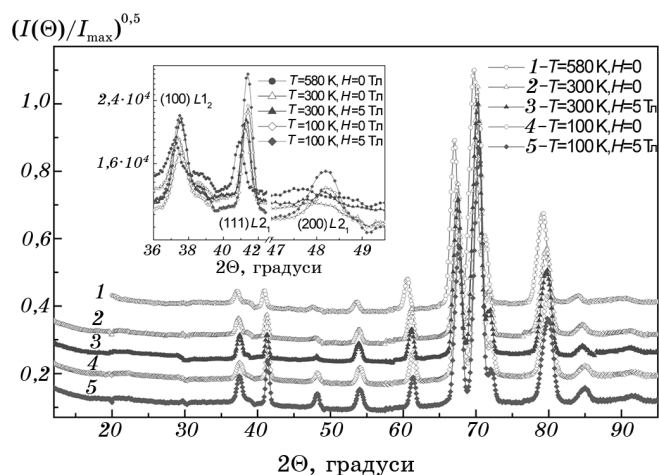


Рис. 3. Вплив температури та магнетного поля на спектри ДН стопу  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$ . Для зручності спектри зсунуто по вертикалі один відносно одного. Вставка показує в деталях малокутову ділянку спектрів.

ретворенням із ФМ у парамагнетний стан в ОЦК-фазі стопу. Подальше збільшення температури викликає різке зростання  $\chi$  при  $T > 400$  К, яке може бути викликано метамагнетним перетворенням з АФМ- у ФМ-стан у ГЦК-фазі стопу. Температура Кюрі стопу  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  (або більш коректно ГЦК-фазі стопу) становить  $T_C = 800$  К. Співвідношення величин магнетної сприйнятливості двох фаз із врахуванням їх вмісту в стопі корелює із теоретичними величинами намагнетованості  $L_{1_2}$ - та  $L_{2_1}$ -фаз ( $\mu_{L_{1_2}} = 6,11 \mu_B/\text{ф.о.}$  та  $\mu_{L_{2_1}} = 2,036 \mu_B/\text{ф.о.}$  відповідно). Температурні вимірювання намагнетованості в невеликих магнетних полях також свідчать про існування магнетного перетворення в стопі в області низьких температур (імовірно зумовленого перетворенням в ОЦК-фазі стопу), хоча і дещо при інших температурах.

Антиферромагнетна ГЦК-фаза стопу при малих зовнішніх магнетних полях практично не впливає на хід результуючої намагнетованості. Але досить великі зовнішні магнетні поля ( $H = 5$  Тл) викликають зміну магнетного порядку в ГЦК-фазі стопу з АФМ на ФМ, роблячи температурну залежність  $M(T)$  типовою для ферромагнетика (див. рис. 4). Однак намагнетованість стопу  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  при низьких температурах не є насиченою навіть в полі  $H = 7$  Тл (див. вставку на рис. 5). Цей факт може свідчити, що залишки АФМ-фазі ще існують у стопі навіть при таких значних магнетних полях. На користь існування АФМ-фазі в стопі  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  (принаймні при низьких температурах,  $T = 50$  К) свідчить також аномальна поведінка початкової ділянки кривої  $M(H)$  (практично лінійна залежність намагнетованості від зовнішнього поля, див.

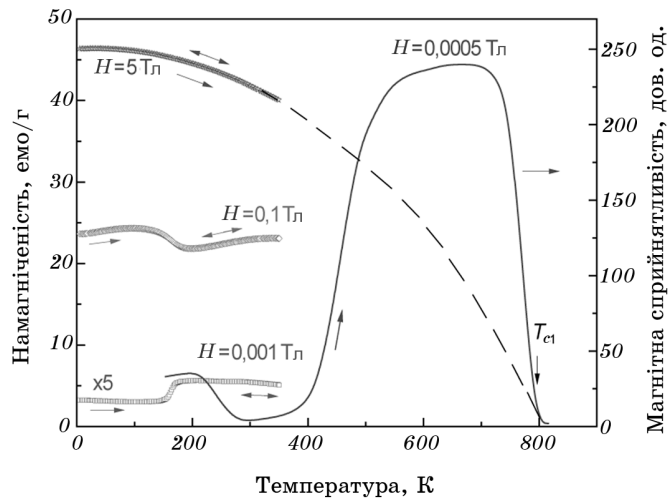


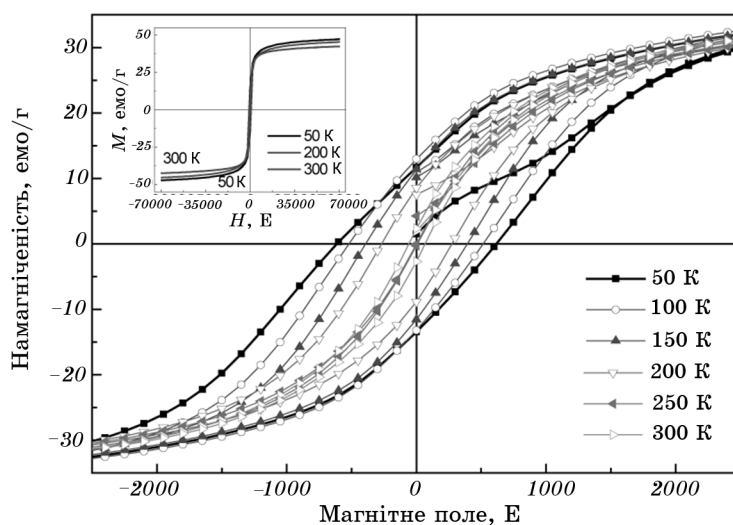
Рис. 4. Температурні залежності намагнетованості (ліва шкала) та магнетної сприйнятливості (права шкала) стопу  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$ , що були одержані в різних магнетних полях. Пунктир лише гід для очей.

рис. 5).

Таким чином можна вважати експериментально доведеним, що в стопі  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  за відсутності сильних магнетних полів присутні як АФМ-, так і ФМ-фази, носіями яких є відповідно ГЦК( $L1_2$ )- та ОЦК( $L2_1$ )-фази. Однак всупереч очікуванням, обмінна анізотропія в стопі  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  не виявляється — експериментальні залежності  $M(H)$  в області температур  $50 < T < 300$  К є симетричними відносно нульового магнетного поля. Таку поведінку  $M(H)$  можна пояснити відсутністю переважного напрямку намагнетованості в  $L2_1$ -фазі стопу. З нашої точки зору для формування в стопі  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  значної обмінної анізотропії треба виконати додаткове термомагнетне оброблення зразка — охолодження стопу в значному магнетному полі. Завдяки цьому в ФМ-фазі стопу магнетні моменти будуть орієнтуватися вздовж напрямку зовнішнього магнетного поля. В свою чергу, цей процес на межі поділу ФМ- та АФМ-фаз буде впливати на орієнтацію магнетних моментів в АФМ- $L1_2$ -фазі.

Таким чином, відповідно до результатів дослідження магнетних властивостей стопу  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$ , вимірювання спектрів ДН без зовнішнього магнетного поля при температурах 580 (а), 300 (б) та 100 (в) К відповідає: а) ФМ-стану  $L1_2$ -фази і парамагнетному стану фази  $L2_1$ , б) АФМ-стану  $L1_2$ -фази і парамагнетному стану фази  $L2_1$ , в) АФМ-стану  $L1_2$ -фази і ФМ-стану фази  $L2_1$ .

Формування АФМ-стану в  $L1_2$ -фазі стопу з чіткою антипаралельною орієнтацією магнетних моментів має супроводжуватися подво-



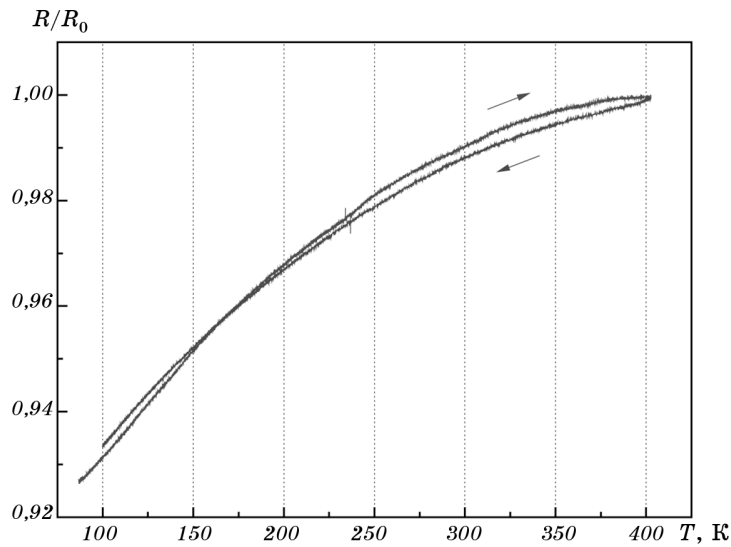
**Рис. 5.** Вплив температури на польові залежності намагнетованості ступу  $\text{Fe}_{50.1}\text{Mn}_{22.7}\text{Ga}_{27.2}$ . Вставка показує частину залежностей  $M(H)$  в полях до  $H = 7$  Тл.

енням відстаней між атомними площинами з однаковими напрямками магнетних моментів. Якщо це так і відбувається, в порошкових спектрах ДН мають з'явитися додаткові рефлекси в малокутовій області спектра. Однак з порівняння кривих 1 та 2 і навіть кривих 1 і 4 на рис. 3 видно, що цього не відбувається. Цей результат може свідчити про те, що магнетний порядок в  $L1_2$ -фазі ступу  $\text{Fe}_{50.1}\text{Mn}_{22.7}\text{Ga}_{27.2}$  при температурі  $T = 300$  К за відсутності магнетного поля не обумовлений строго антипаралельною орієнтацією магнетних моментів у межах окремо взятої елементарної ґратниці, а може бути пов'язаний з більш складною (наприклад спіральною, як у рідкісноземельних металах (РЗМ)) магнетною структурою.

Прикладення зовнішнього магнетного поля викликає значне збільшення інтенсивності надструктурних рефлексів у спектрах ДН, що відносяться як до фази  $L1_2$ , так і до фази  $L2_1$  (див. вставку на рис. 3). Очевидно, що зовнішнє магнетне поле, на відміну від температурного фактора, збільшує ступінь магнетного впорядкування обох фаз.

Як свідчать літературні дані, в дещо нестехіометричних стопах  $\text{Fe}_2\text{MnGa}$ , що містять ОЦК-фазу, в області  $150 < T < 250$  К спостерігається мартенситне перетворення, яке супроводжується значним тепловим ефектом, змінами електроопору та намагнетованості при переході з аустенітної фази в мартенситну або навпаки [4–9]. Але зміна температури в діапазоні  $100 < T < 580$  К та прикладення магнетного поля в 5 Тл не викликає змін у спектрах ДН ступу





**Рис. 6.** Температурна залежність нормованого електроопору стопу  $\text{Fe}_{50.1}\text{Mn}_{22.7}\text{Ga}_{27.2}$ .

$\text{Fe}_{50.1}\text{Mn}_{22.7}\text{Ga}_{27.2}$ , що є характерними для мартенситних перетворень, — спостерігається лише температурний зсув рефлексів та збільшення їх інтенсивності під дією зовнішнього магнетного поля.

Отже, з нашої точки зору, зростання магнетної сприйнятливості в районі  $T \approx 200$  К при охолодженні стопу  $\text{Fe}_{50.1}\text{Mn}_{22.7}\text{Ga}_{27.2}$  обумовлено переходом  $L2_1$ -фази в феромагнетний (феримагнетний згідно з результатами теоретичних розрахунків) стан і не пов'язано з мартенситним перетворенням. Про відсутність мартенситного перетворення в дослідженому в даній роботі стопі  $\text{Fe}_{50.1}\text{Mn}_{22.7}\text{Ga}_{27.2}$  може також свідчити відсутність будь-яких особливостей на температурній залежності електроопору в інтервалі  $100 < T < 400$  К (див. рис. 6).

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Якщо антиферомагнетний порядок дійсно формується в ГЦК-фазі стопу  $\text{Fe}_{50.1}\text{Mn}_{22.7}\text{Ga}_{27.2}$ , цей порядок не є строго антипаралельним у межах кожної елементарної ґратниці, а може бути більш складним (наприклад, спіральним, як в РЗМ). Для визначення типу АФМ-порядку в стопі  $\text{Fe}_2\text{MnGa}$  потрібно виконати додаткові дослідження.

2. Відсутність значної обмінної анізотропії в двофазному стопі  $\text{Fe}_{50.1}\text{Mn}_{22.7}\text{Ga}_{27.2}$ , що одночасно містить АФМ-ГЦК-фазу та ФМ-ОЦК-фазу, обумовлено, ймовірно, хаотичною орієнтацією магнетних моментів зерен ФМ-фази стопу. Для формування значної об-

мінної анізотропії в двофазному стопі  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  необхідно виконати додаткове термомагнетне оброблення стопу, спрямоване на примусову орієнтацію в одному напрямку магнетних моментів у ФМ-фазі стопу. Це, в свою чергу, нав'язує певну орієнтацію магнетних моментів в усіх АФМ-областях, що межують з ФМ-фазою.

3. Феромагнетизм ОЦК-фазі стопу  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  є її притаманною властивістю, яка не пов'язана з мартенситним перетворенням у стопі.

4. Хоча досліджений нами стоп  $\text{Fe}_{50,1}\text{Mn}_{22,7}\text{Ga}_{27,2}$  має склад і термообробку практично ідентичні тим, які були досліджені Жу та ін., на відміну від літературних даних, слідів мартенситних перетворень у стопі, що досліджувався в даній роботі, не було виявлено.

Роботу було виконано за підтримки проекту 2/14-Д Державної цільової науково-технічної програми «Нанотехнології та наноматеріали» на 2010–2014 роки.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. X. D. Tang, W. H. Wang, W. Zhu, E. K. Liu, G. H. Wu, F. B. Meng, H. Y. Liu, and H. Z. Luo, *Appl. Phys. Lett.*, **97**: 242513 (2010).
2. X. D. Tang, W. H. Wang, G. H. Wu, F. B. Meng, H. Y. Liu, and H. Z. Luo, *Appl. Phys. Lett.*, **99**: 222506 (2011).
3. T. Gasi, A. K. Nayak, M. Niklas, and C. Felser, *J. Appl. Phys.*, **113**: 17E301 (2013).
4. C. W. Shih, X. G. Zhao, H. W. Chang, W. C. Chang, and Z. D. Zhang, *J. Alloys Compd.*, **570**: 14 (2013).
5. W. Zhu, E. K. Liu, L. Feng, X. D. Tang, J. L. Chen, G. H. Wu, H. Y. Liu, F. B. Meng, and H. Z. Luo, *Appl. Phys. Lett.*, **95**: 222512 (2009).
6. T. Omori, K. Watanabe, R. Y. Umetsu, R. Kinuma, and K. Ishida, *Appl. Phys. Lett.*, **95**: 082508 (2009).
7. T. Omori, K. Watanabe, X. Xu, R. Y. Umetsu, R. Kainuma, and K. Ishida, *Scr. Mater.*, **64**: 669 (2011).
8. C. A. Jenkins, A. Scholl, R. Kainuma, H. J. Elmers, and T. Omori, *Appl. Phys. Lett.*, **100**: 032401 (2012).
9. V. V. Khovaylo, T. Omori, K. Endo, X. Xu, R. Kainuma, A. P. Kazakov, V. N. Prudnikov, E. A. Gan'shina, A. I. Novikov, Yu. O. Mikhailovsky, D. E. Mettus, and A. B. Granovsky, *Phys. Rev. B*, **87**: 174410 (2013).
10. Y. V. Kudryavtsev, N. V. Uvarov, V. N. Iermolenko, I. N. Glavatskiy, and J. Dubowik, *Acta Mater.*, **60**: 4780 (2012).