



ИФ им. Л.В. Киренского СО РАН
ФИЦ КНЦ СО РАН

Исследование влияния условий роста на магнитные и транспортные свойства эпитаксиальных плёнок Mn_5Ge_3 на $\text{Si}(111)$

к.ф.-м.н., н.с. РСЭ, Лукьяненко Анна Витальевна
lav@iph.krasn.ru

Томск
23.09.2026

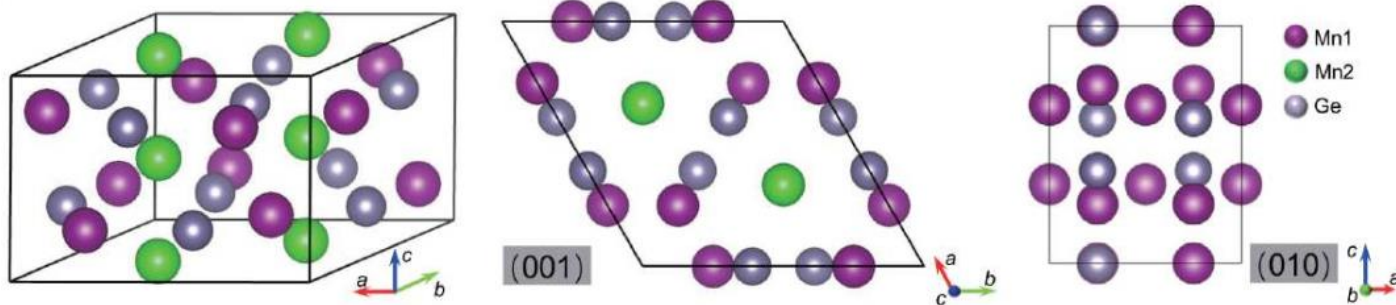
Список публикаций

1. Tarasov, A.S., Komogortsev, S.V., Lukyanenko, A.V. I. A. Yakovlev, I. A. Tarasov, A. L. Sukhachev, M. V. Rautskii, L. A. Solovyov, T. A. Andryushchenko, I. A. Bondarev, S. N. Varnakov & N. V. Volkov. **Structure, magnetic and magnetocaloric properties of the Mn₅Ge₃ thin film grown on Si(111)**. Journal of Materials Science. 2024. Vol. 59. P. 9423–9436. (Scimago Q1 WOS Q1, БС1)
2. M. V. Rautskii, A. V. Lukyanenko, S. V. Komogortsev, I. A. Sobolev, L. V. Shanidze, I. A. Bondarev, M. A. Bondarev, E. V. Eremin, I. A. Yakovlev, A. L. Sukhachev, M. S. Molokeev, L. A. Solovjov, S. N. Varnakov, S. G. Ovchinnikov, N. V. Volkov, and A. S. Tarasov. **Buffer Layer Effect on the Structure, Morphology, and Magnetic Properties of Mn₅Ge₃ Films Synthesized on Si(111) Substrates**. Physics of Metals and Metallography, 2024, Vol. 125, No. 12, pp. 1327–1336. (Scimago Q3, WOS Q3, БС2)
3. A. V. Lukyanenko, L. V. Shanidze, M. V. Rautskii, I. A. Yakovlev, A. L. Sukhachev, K. Yu. Maksimov, A. Yu. Goikhman, N. V. Volkov, and A. S. Tarasov. **Magnetoresistive Effect in Vertical Fe₃Si/Ge/Mn₅Ge₃/Si(111) Hybrid Structures**. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2024, Vol. 88, Suppl. 1, pp. S42–S46. (Scimago Q3, БС3)
4. И.А. Яковлев, А.В. Лукьяненко, А.С. Тарасов, С.Н. Варнаков. **Исследование методом ДОБЭ начальных этапов эпитаксиального роста Mn₅Ge₃ на Si(111)**. Физика твердого тела, 2025, том 67, вып. (RSCI, БС2)
5. Tarasov A. S., Komogortsev S. V., Rautskii M. V., Lukyanenko A. V., Sukhachev A. L., Yakovlev I. A. **Magnetic phase transition in Mn₅Ge₃ (001) film on Si (111)** //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2025. – С. 173467. 5 (Scimago Q2, WOS Q2, БС1)

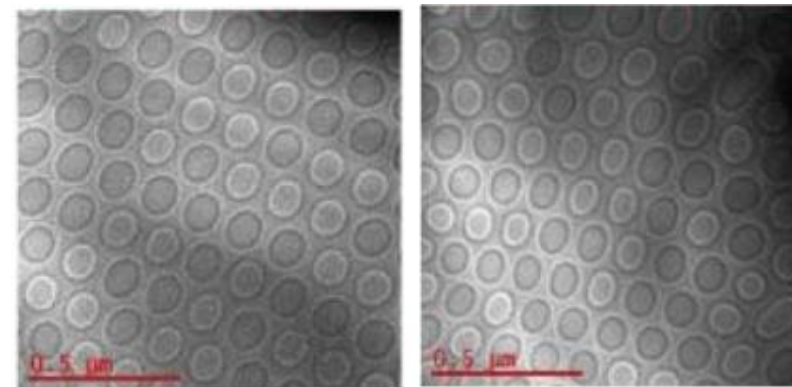
План доклада

- Мотивация
- Рост плёнок $\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$
- Магнитный фазовый переход. МКЭ
- Влияние буферного слоя на физические свойства плёнки
- Исследование начальных этапов роста
- Вертикальные гибридные структуры
- Выводы

Монокристаллы Mn_5Ge_3

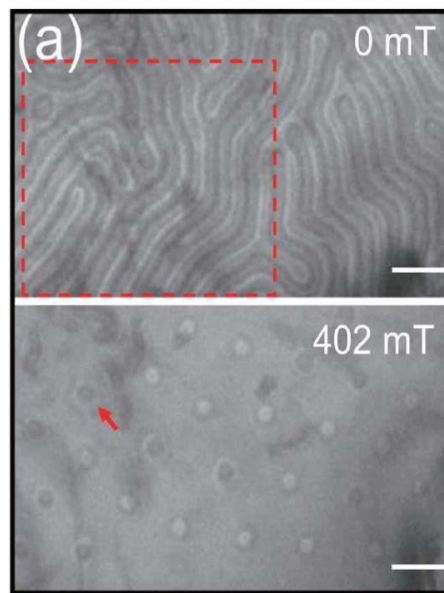


Кристаллическая структура Mn_5Ge_3 с видом сверху и поперечным сечением вдоль осей c и b

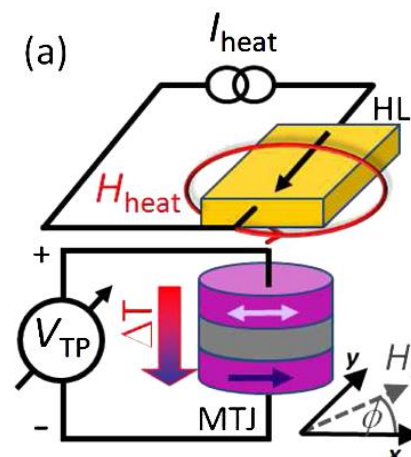


Nano Lett. 2025, 25, 7, 2903–2910

- Гексагональный $\text{P6}_3/\text{mcm}$ «легкоосный» ферромагнетик
- $T_c = 300$ K и может быть настроена замещением
- МКЭ эффект близкий по величине к РЗМ
- Значительная спиновая поляризация ($P > 40\%$)
- Гигантский и топологический аномальный эффект Холла
- Цилиндрические домены и скирмионы



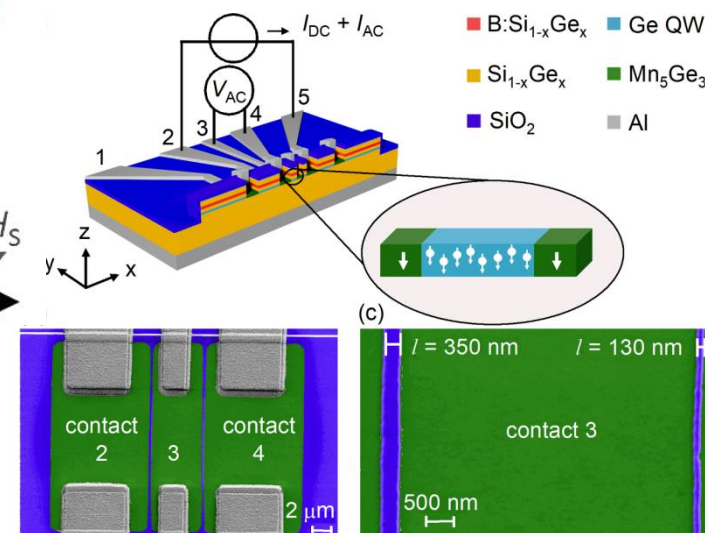
Science China Physics, Mechanics & Astronomy 69.4 (2026): 247511.



Phys. Rev. Lett. 107, 177201

Lateral Mn_5Ge_3 spin-valve in contact with a high-mobility Ge two-dimensional hole gas

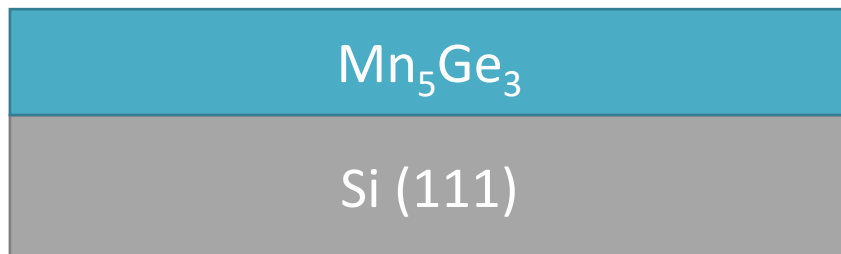
To cite this article: David Weißhaupt et al 2024 *Semicond. Sci. Technol.* **39** 125004



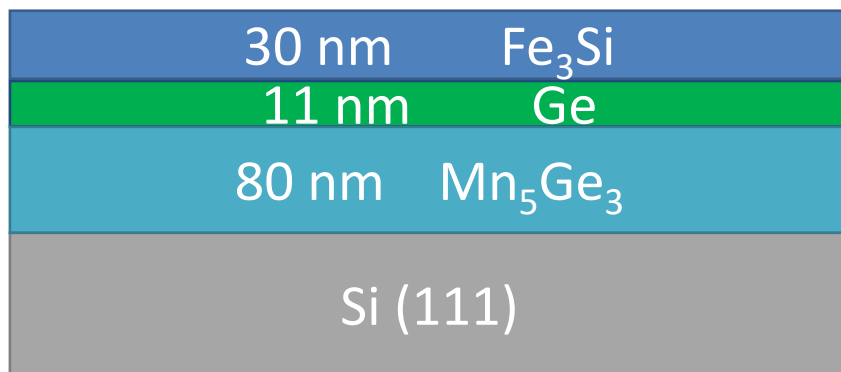
Рост плёнок Mn_5Ge_3 и гибридных структур

MBE system «Angara»
In situ RHEED

$\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$



$\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}/\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$

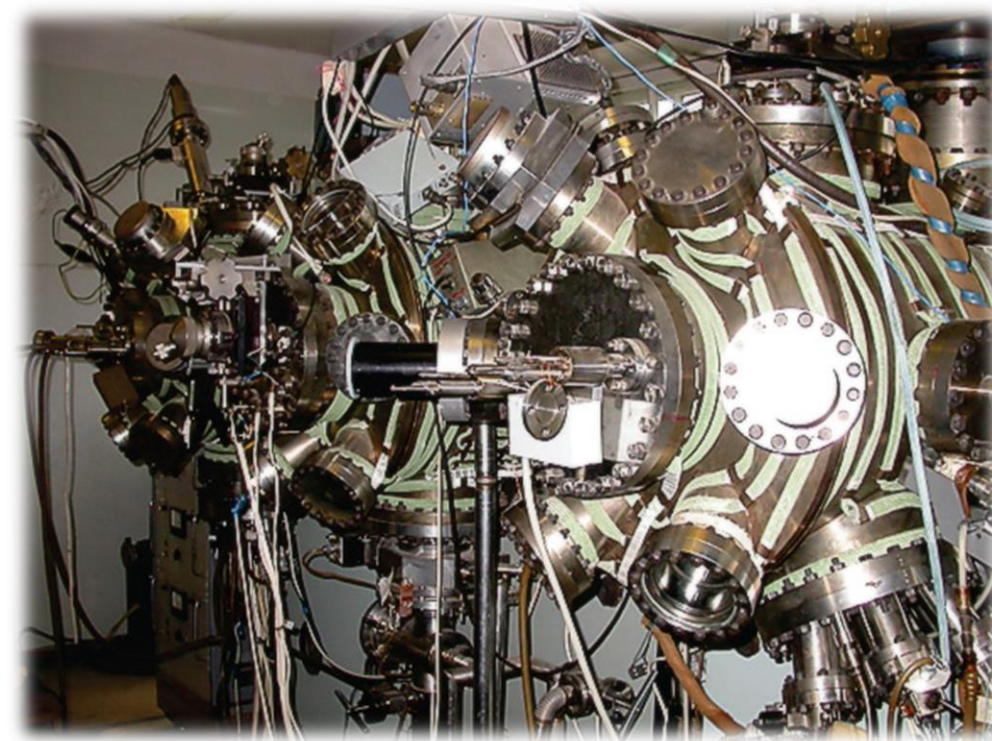


Свойства Fe_3Si

- FM ($T_C = 840$ K)
- $P = 43$ %

Свойства Mn_5Ge_3

- FM ($T_C = 296$ K)
- $P = 42$ %
- magnetocaloric effect



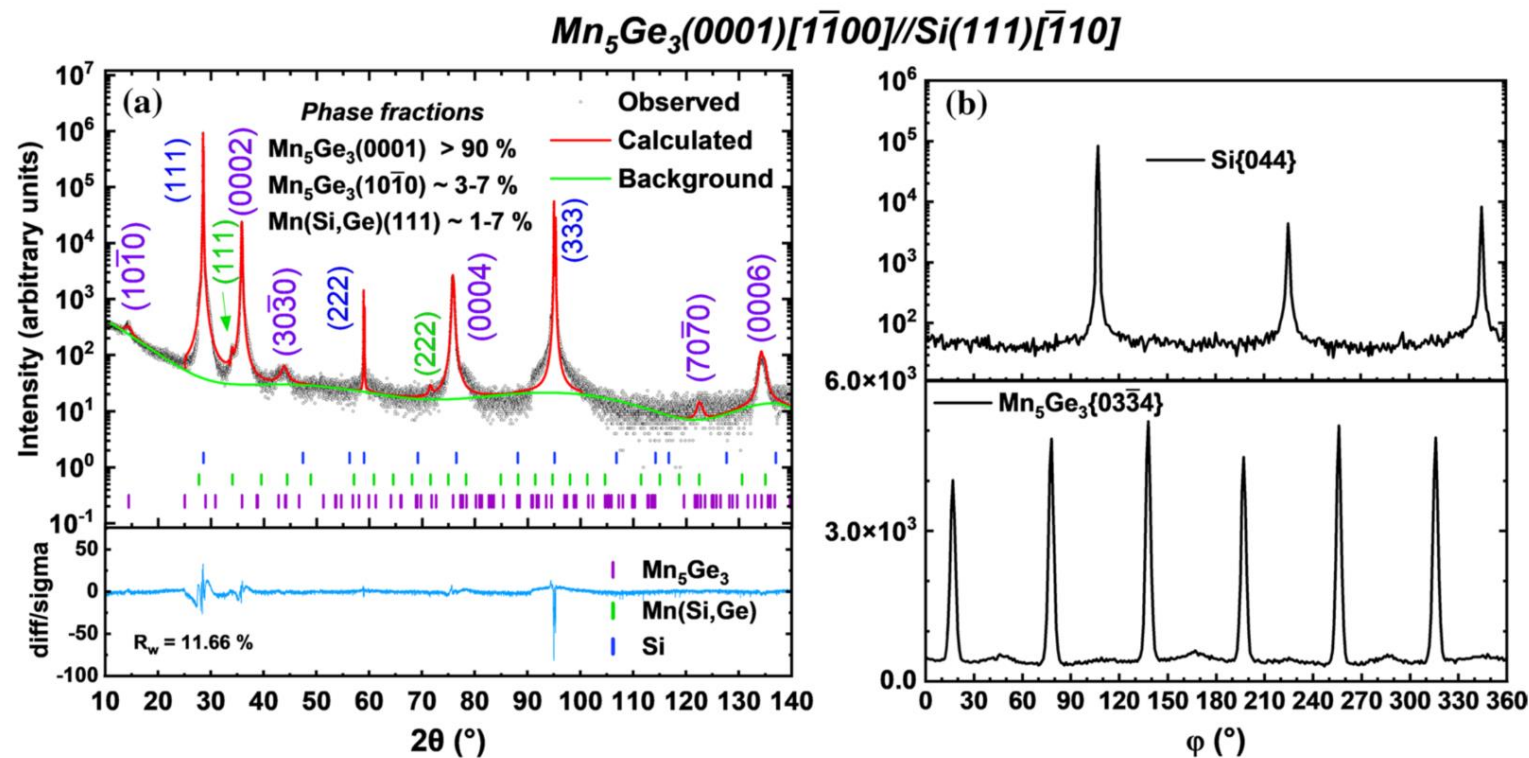
Метод – МЛЭ (10^{-8} Па)

Подложки - n- и p-Si (111)

$p=10^{18}$ 1/cm³ ($\rho = 20\text{--}40$ m $\Omega\cdot\text{cm}$)

Fe, Si, Ge, Mn испарились из отдельных источников

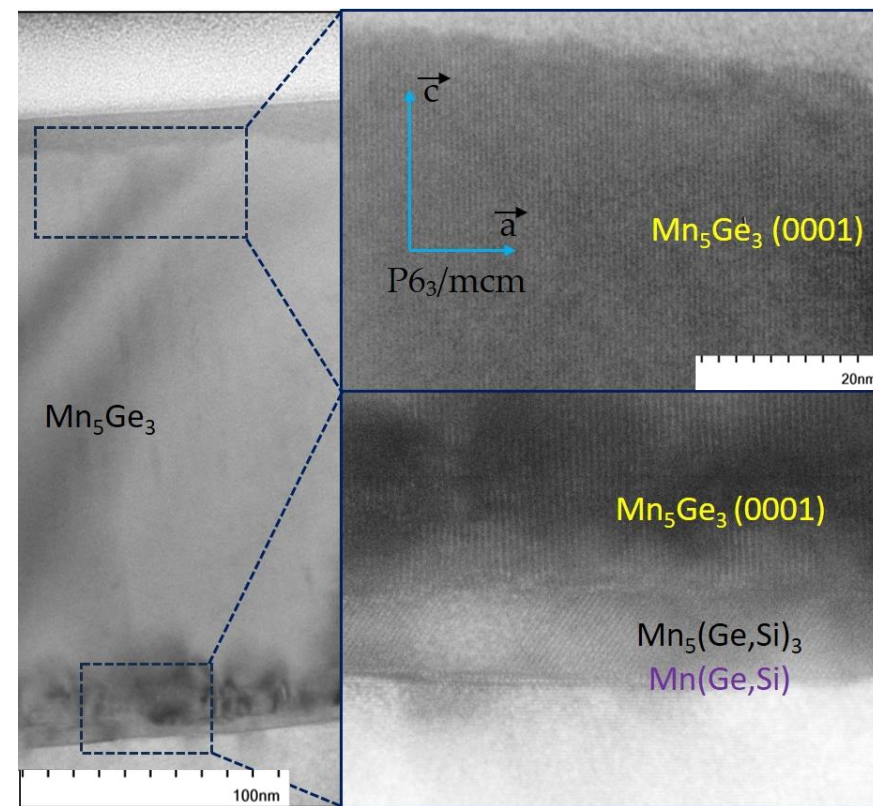
Кристаллическая структура $\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$



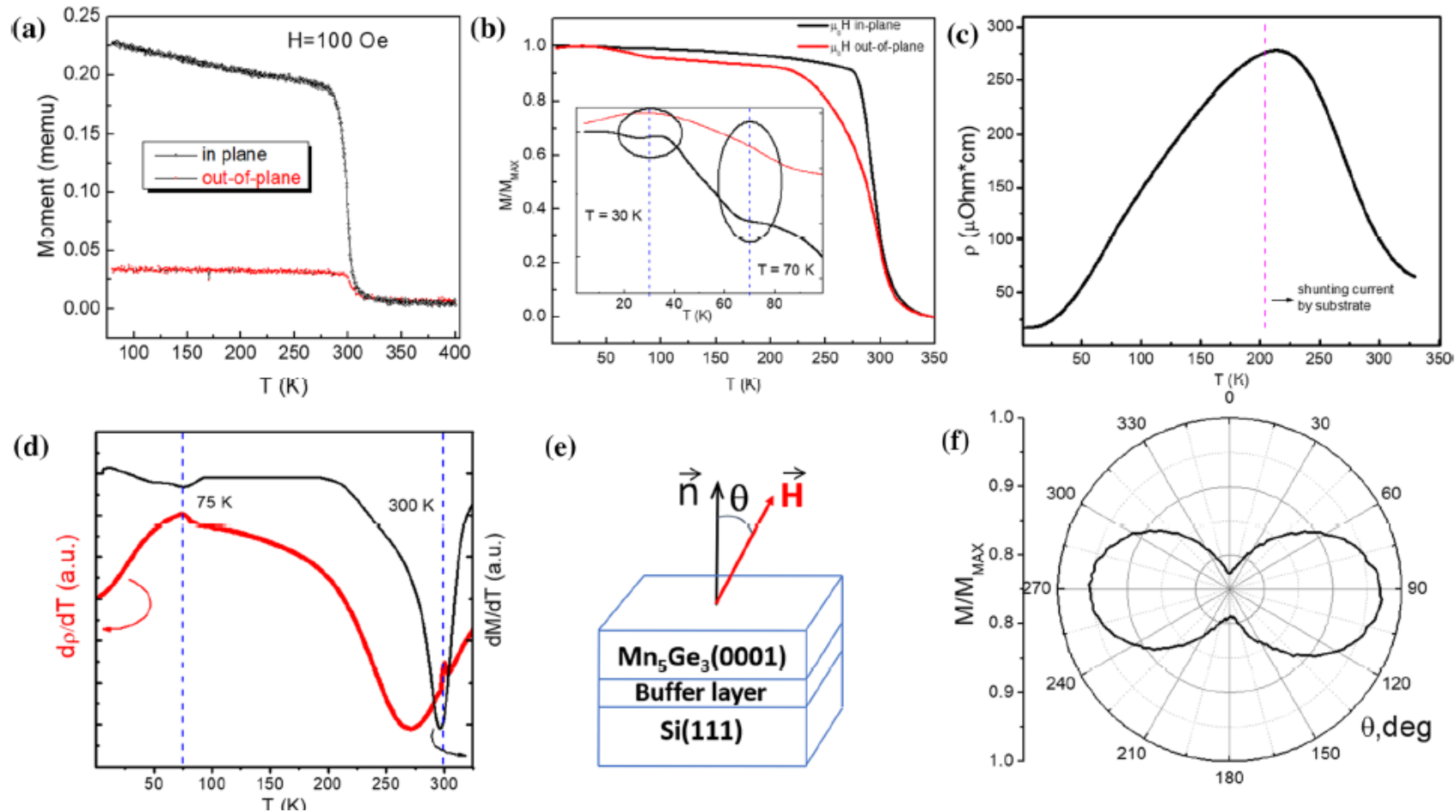
Более 90% объема кристаллитов ориентировано осью c перпендикулярно поверхности полочки. Несколько процентов можно отнести к кубическому $\text{Mn}(\text{Si},\text{Ge})(111)$

Параметры ячейки Mn_5Ge_3
из РСА, ДОБЭ, ПЭМ
 $a = b = 7.112(1) \text{ \AA}$
 $c = 5.027(1) \text{ \AA}$

- ПЭМ подтвердил ориентацию (0001)
- Буферный слой состоит из $\text{Mn}_5(\text{Ge},\text{Si})_3$
- Кубический $\text{Mn}(\text{Si},\text{Ge})(111)$ состоит из преципитатов встроенных в интерфейс



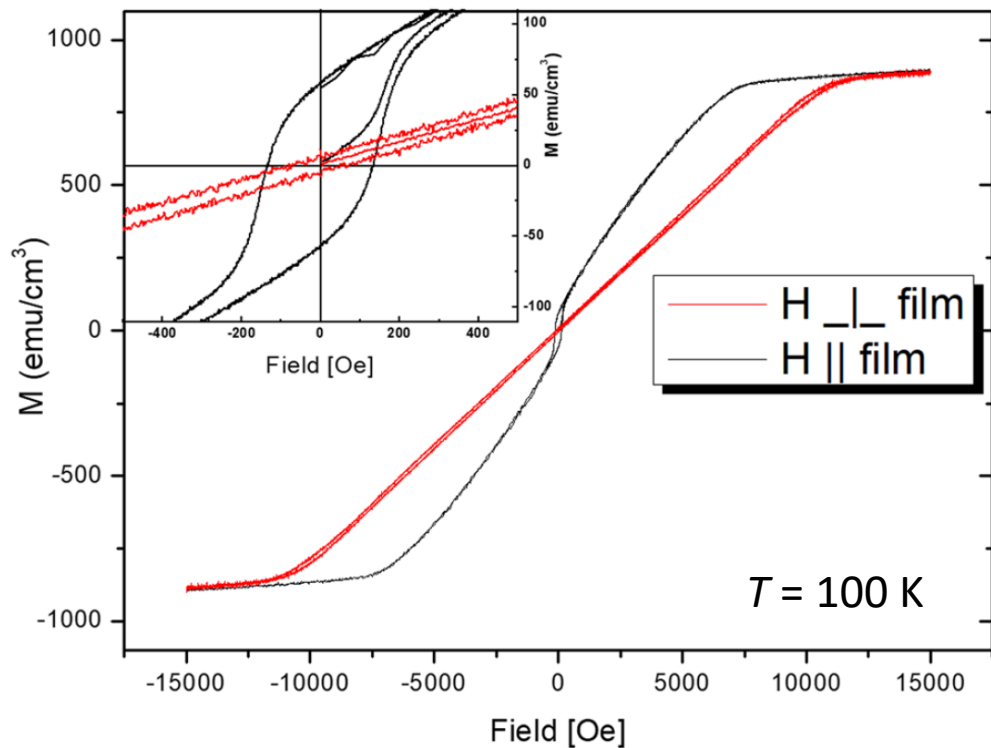
Температура упорядочения $\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$



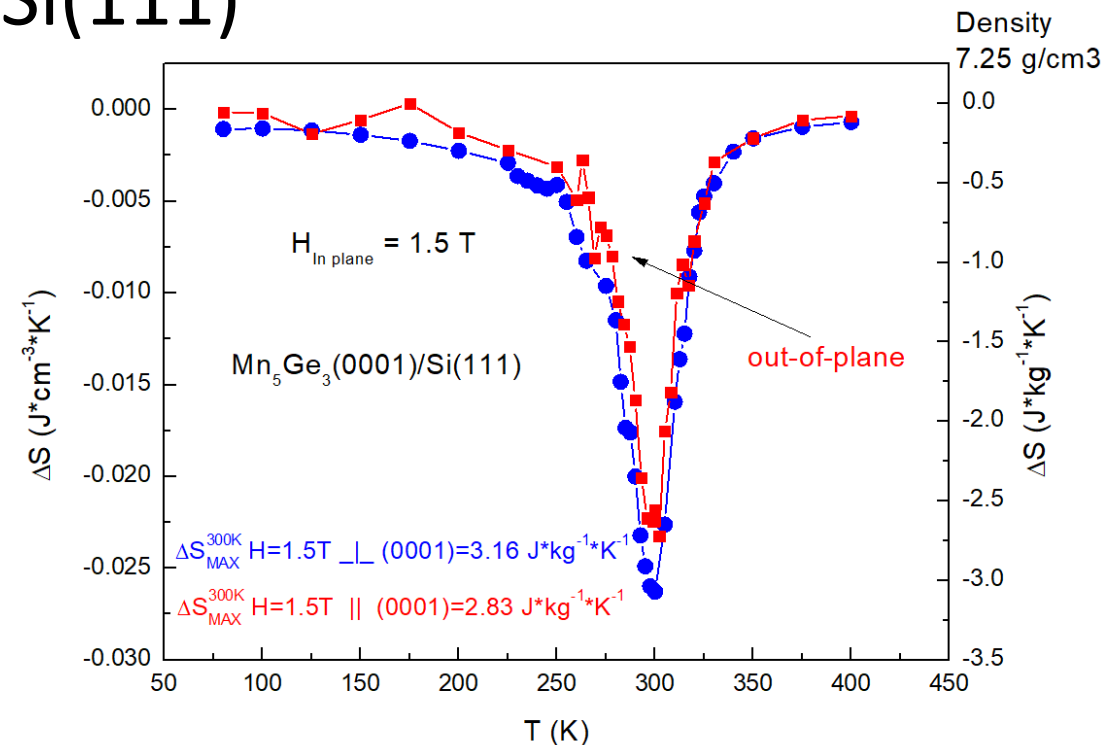
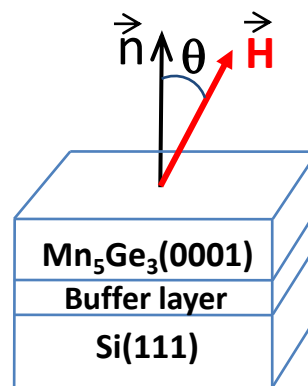
Температурные зависимости магнитного момента $M(T)$, измеренные в параллельном и перпендикулярном магнитном поле 100 Э (a) и в параллельном магнитном поле 5 кЭ в расширенной температурной области (b). Температурная зависимость удельного сопротивления (c). Производные магнитного момента dM/dT (правая панель) и удельного сопротивления $d\rho/dT$ (левая панель) (d). Экспериментальная геометрия и структура пленки, выращенной на тонком буферном слое (e), зависимость магнитного момента от полярного угла в магнитном поле 5 кЭ (f).

Кривые намагничивания $\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$

Легкая ось || с || нормали к пленке



$M(H)$ имеют форму характерную для пленок с перпендикулярной магнитной анизотропией в закритическом состоянии



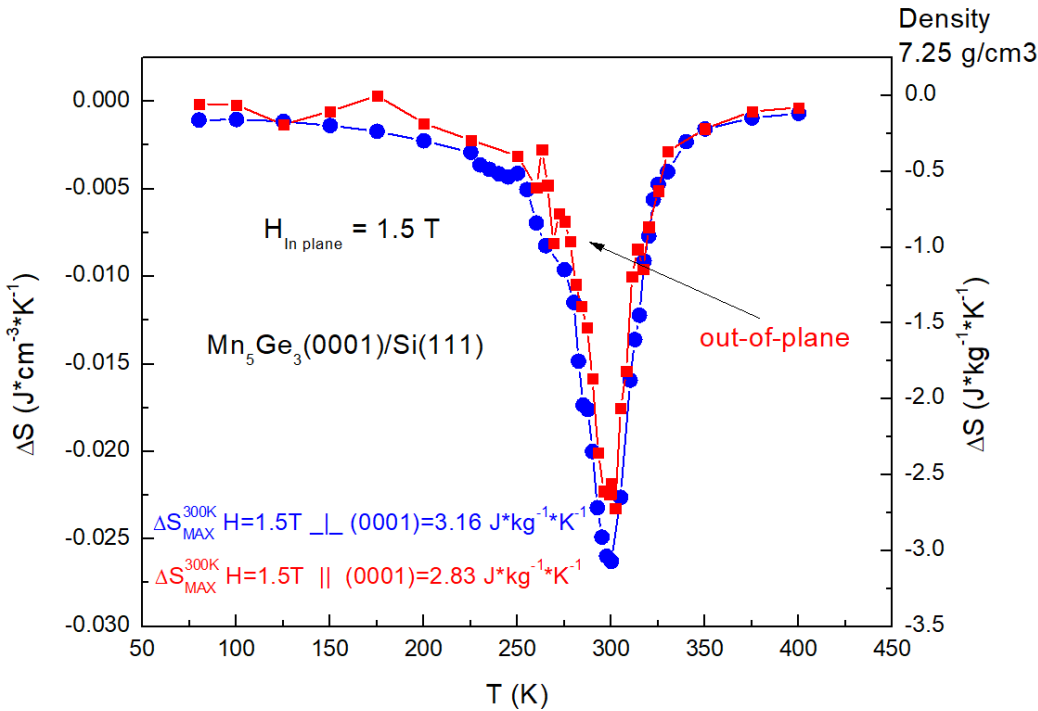
Изменение магнитной энтропии ΔS в пленке $\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}$, определенное по данным намагниченности в поле 15 кЭ (1,5 Тл) перпендикулярно (синие кружки) и параллельно (красные квадраты) плоскости (0001)

Киренский Л.В. Магнито-термический эффект при вращении ферромагнитного монокристалла в магнитном поле // Дисс. канд. физ.-мат. наук. Москва. – 1939. – 39 с.
Akulov N.S., and Kirensky L.W. Über einen neuen magnetokalorischen effekt // J. Phys. USSR. – 1940. – Vol. 3. – P. 31-34.

Анизотропия МКЭ в $\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$

Film/substrate or bulk material	H direction	$ \Delta S $ (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	T _S (K)
$\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{GaAs}(001)$	H IP	1.59	293
$\text{Mn}_5\text{Ge}_3(0001)/\text{GaAs}(111)$	H ab IP	1.75	290
Bulk Mn_5Ge_3	H c	2.5	296
Bulk Mn_5Ge_3	H ab	2.15	296
$\text{Mn}_5\text{Ge}_3(0001)/\text{Si}(111)$	H ab IP	2.10	300
$\text{Mn}_5\text{Ge}_3(0001)/\text{Si}(111)$	H c OOP	1.88	300
$\text{La}_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$	H IP	2.17	290
$\text{La}_{0.85}\text{Ag}_{0.15}\text{MnO}_3/\text{LaAlO}_3$	H IP	1.32	273
$\text{GdCoO}_3/\text{LaAlO}_3$	H IP	6.4	3.5
Gd/Si(001)	H IP	2.5	293
Epitaxial Tb(0001)/Nb/Al ₂ O ₃	H a IP	3.14	232
Epitaxial Tb(0001)/Nb/Al ₂ O ₃	H c OOP	0.56	232
Amorphous Tb/Nb/Al ₂ O ₃	H IP	1	227

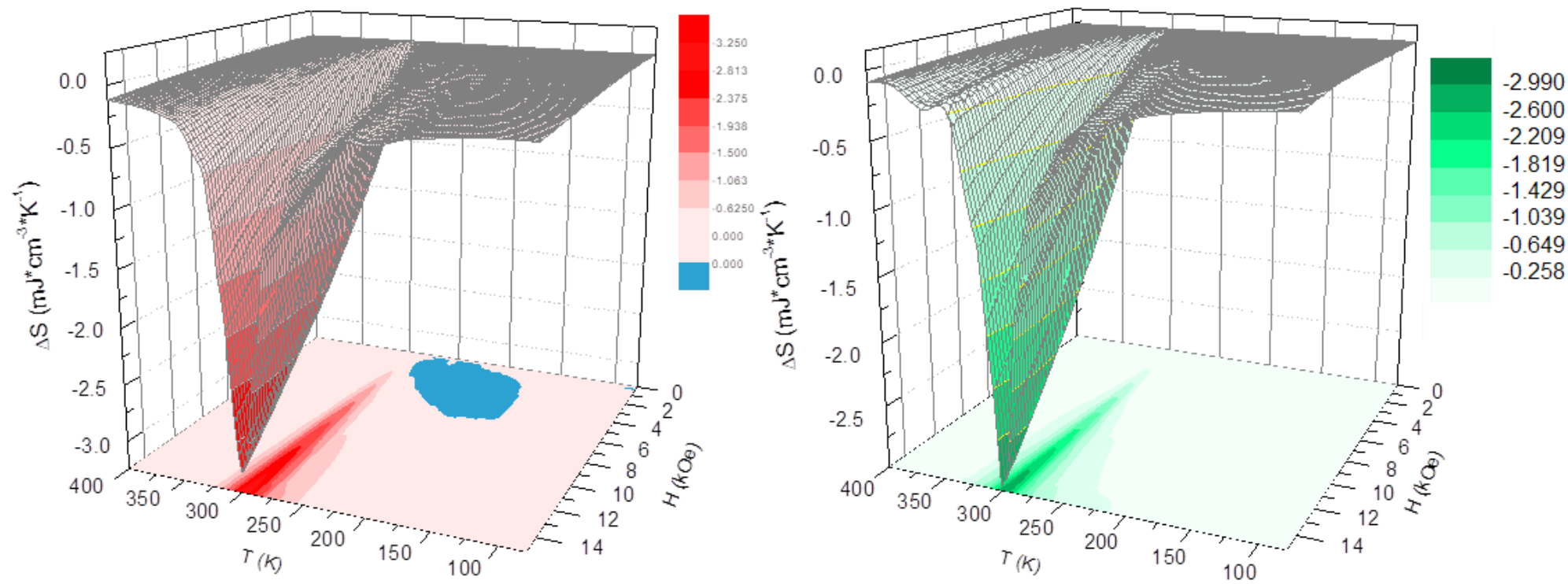
$|\Delta S| >$ чем в других плёнках Mn_5Ge_3



Изменение магнитной энтропии ΔS в пленке $\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}$, определенное по данным намагниченности в поле 15 кЭ (1,5 Тл) перпендикулярно (синие кружки) и параллельно (красные квадраты) плоскости (0001). [1]

Особенности магнитной анизотропии в тонкой пленке приводят анизотропии МКЭ, противоположной эффекту в монокристалле

Карта МКЭ $\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$



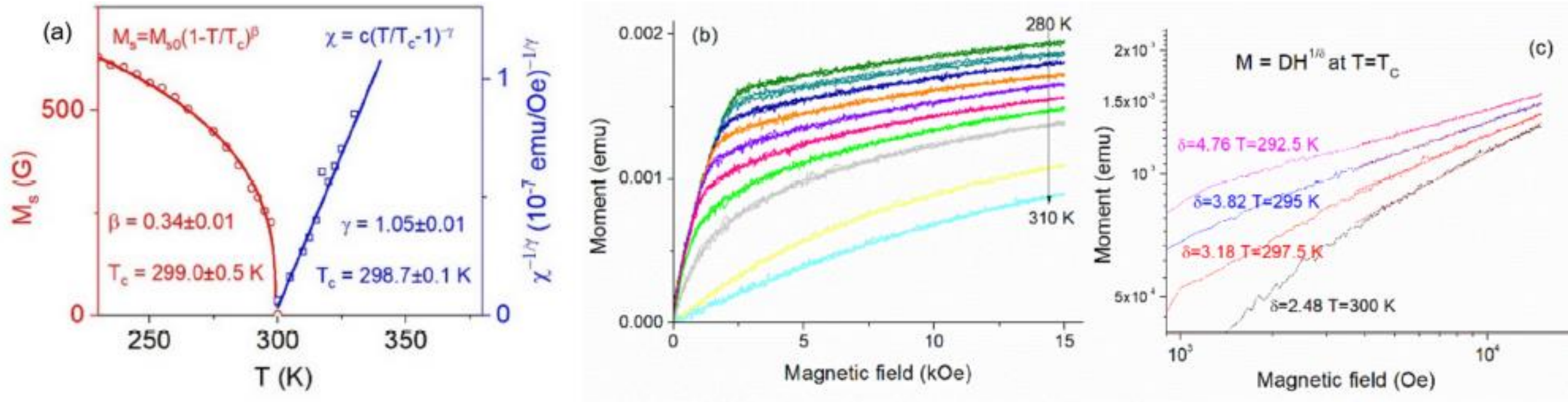
Зависимость изменения энтропии ΔS от температуры и магнитного поля, приложенного в плоскости пленки (а) и перпендикулярно плоскости пленки (б)

При $H \parallel [001]$ и < 6 kOe, $\Delta S > 0$ из-за магнитокристаллической анизотропии

При $H \perp [001]$ не проявляется

Схожее поведение в монокристаллах Mn_5Ge_3

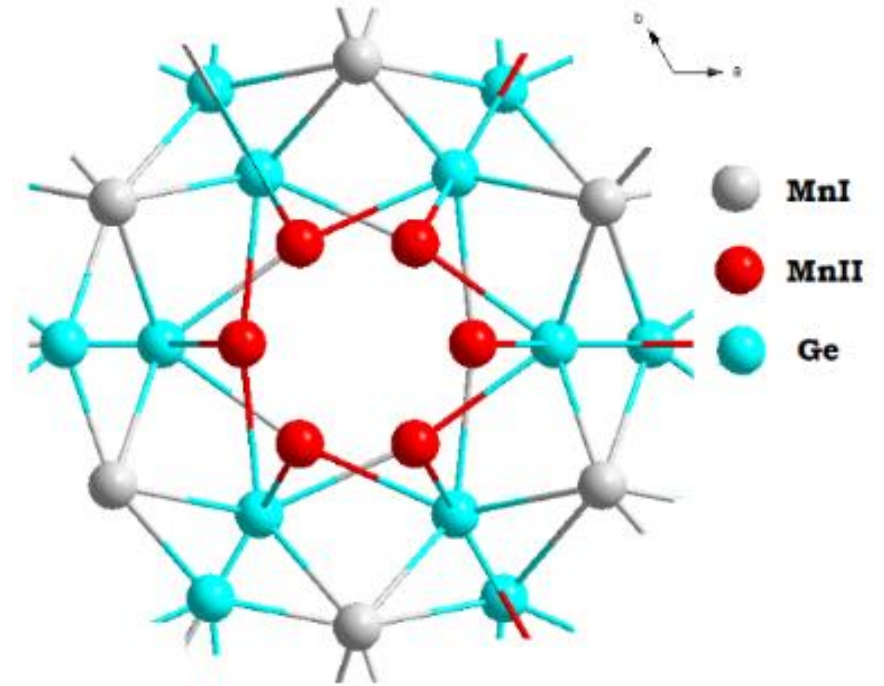
Магнитный фазовый переход. Критические индексы



(a) Температурные зависимости намагниченности насыщения и парамагнитной восприимчивости $M_s(T)$ и $\chi(T)$, рассчитанные по изотермам намагниченности $M(T)$ (b). (c) $M(T)$ для температур, близких к T_c , построенная в логарифмическом масштабе для определения δ

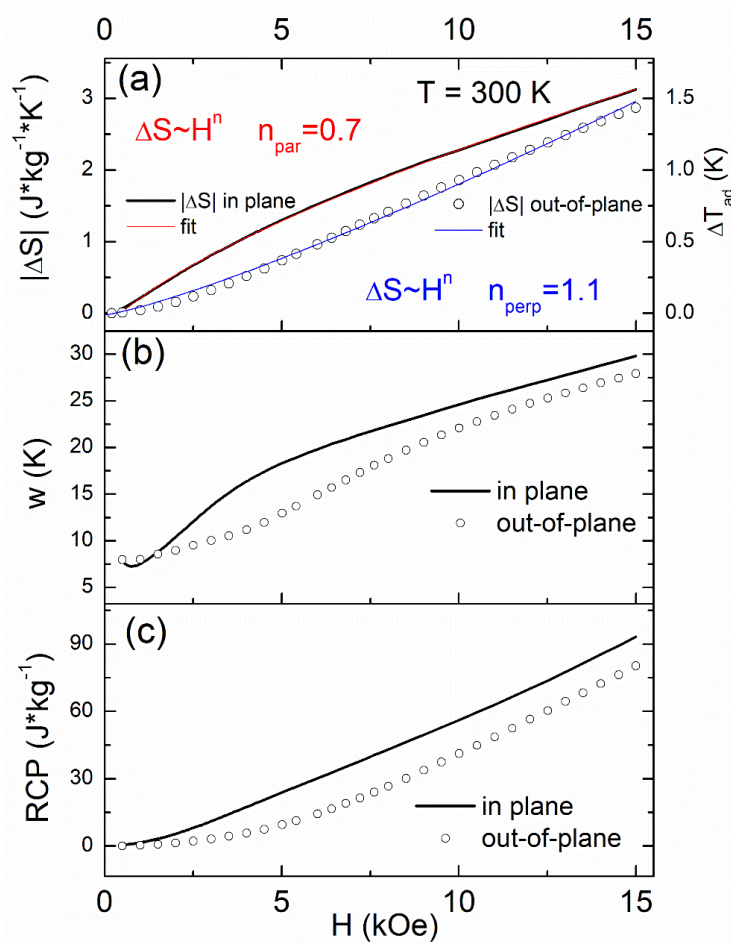
Магнитный фазовый переход. Критические индексы

	β	γ	δ
Mean-field model	0.5	1.0	3
Heisenberg model, d=3	0.365	1.386	4.807
Ising model, d=3	0.3125	1.241	4.815
Mn₅Ge₃ film H [100]	0.34	1.05	3.82
Mn ₅ Ge ₃ bulk ribbons	0.37	1.05	3.88
Mn ₅ Ge ₃ Polycrystalline	0.48	-	3.8
Mn ₅ Ge ₃ single crystal	0.336	1.193	4.55



- Критические индексы близки монокристаллам и поликристаллам Mn₅Ge₃
- Отклонение β и γ от модельных может быть связано анизотропией обменного взаимодействия из-за неэквивалентных позиций марганца в решетке

Полевая зависимость энтропии $\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$



Зависимости $|\Delta S_{\max}|$ от поля (а) (левая панель), адиабатического изменения температуры ΔT_{ad} (а) (правая панель), ширины на половине высоты $\Delta S(T)$ (b) и относительной охлаждающей способности RCP (c) (b) и ширины на половине максимума $\Delta S(T)$ (c)

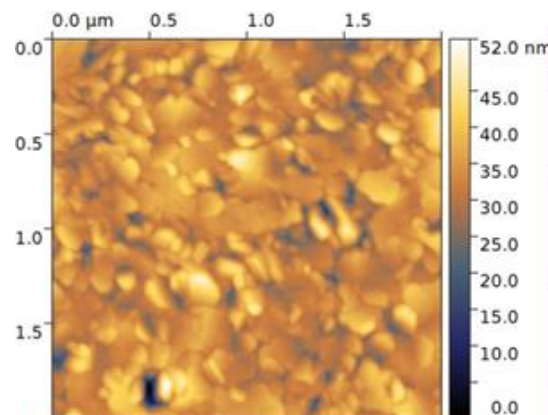
- $\Delta S(H)$ демонстрирует анизотропию
- Для $H \parallel [100]$ (в плоскости, перпендикулярно оси c) $n = 0.7$, что соответствует другим экспериментам
- Для $H \parallel [001]$ (перпендикулярно плоскости, вдоль оси c) $n = 1.1$, что может быть связано с анизотропией формы
- ΔT_{ad} составляет 1.5 K при 15 kOe, что согласуется с прямыми измерениями в монокристалле
- Относительная хладопроизводительность также как и $\Delta S(H)$ демонстрирует анизотропию

Magnetocaloric parameters of Mn_5Ge_3 .

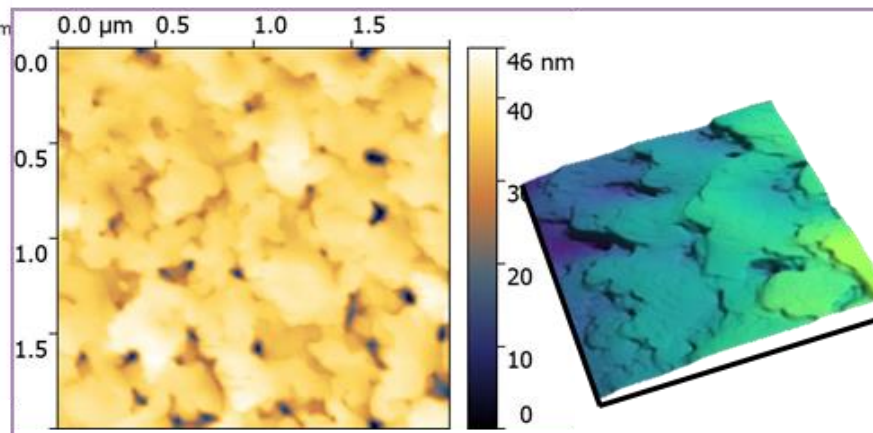
	$\Delta S (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	RCP (J/kg)	Reference
Mn_5Ge_3 film $H \parallel [100]$	3.2 at 15 kOe	91 at 15 kOe	This work
Mn_5Ge_3 film $H \parallel [001]$	2.9 at 15 kOe	80 at 15 kOe	This work
Mn_5Ge_3 single crystal $H \parallel [100]$	4.0 at 20 kOe	145 at 20 kOe	[26]
Mn_5Ge_3 polycrystalline	3.9 at 20 kOe	125 at 20 kOe	[23]
Mn_5Ge_3 polycrystalline	3.8 at 20 kOe	133 at 20 kOe	[28]
Mn_5Ge_3 bulk ribbons	4.9 at 30 kOe	—	[15]

*RCP (Relative Cooling Power)

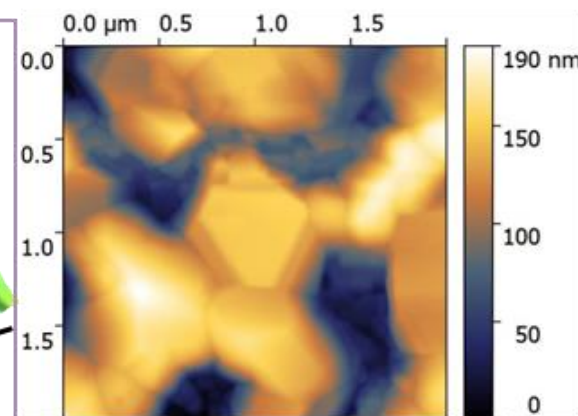
Влияние условий роста Mn_5Ge_3



$T=330^\circ$
 $\text{Rms}(\text{Rq})=3.44 \text{ nm}$



$T=390^\circ$
 $\text{Rms}(\text{Rq})=1.22 \text{ nm}$



$T=430^\circ$
 $\text{Rms}(\text{Rq})=20.53 \text{ nm}$

330°C

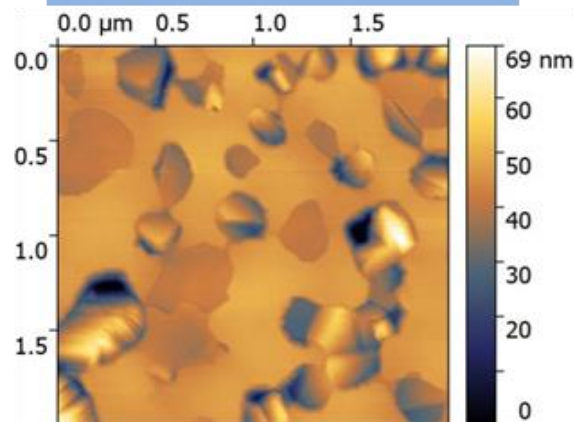
350°C

390°C

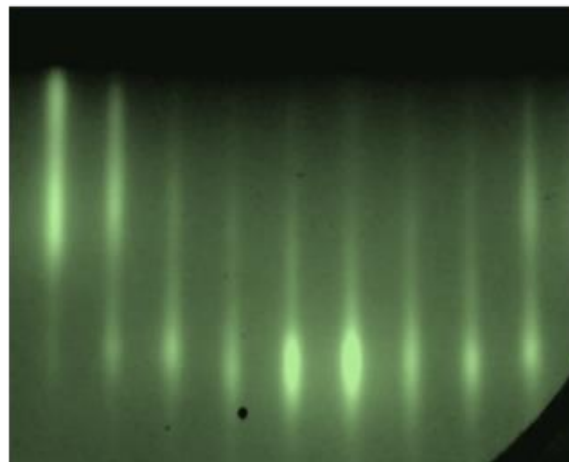
400°C

430°C

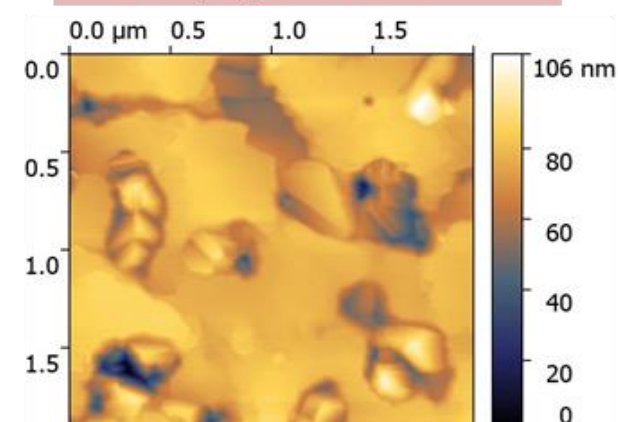
$T=350^\circ$
 $\text{Rms}(\text{Rq})=1.71 \text{ nm}$



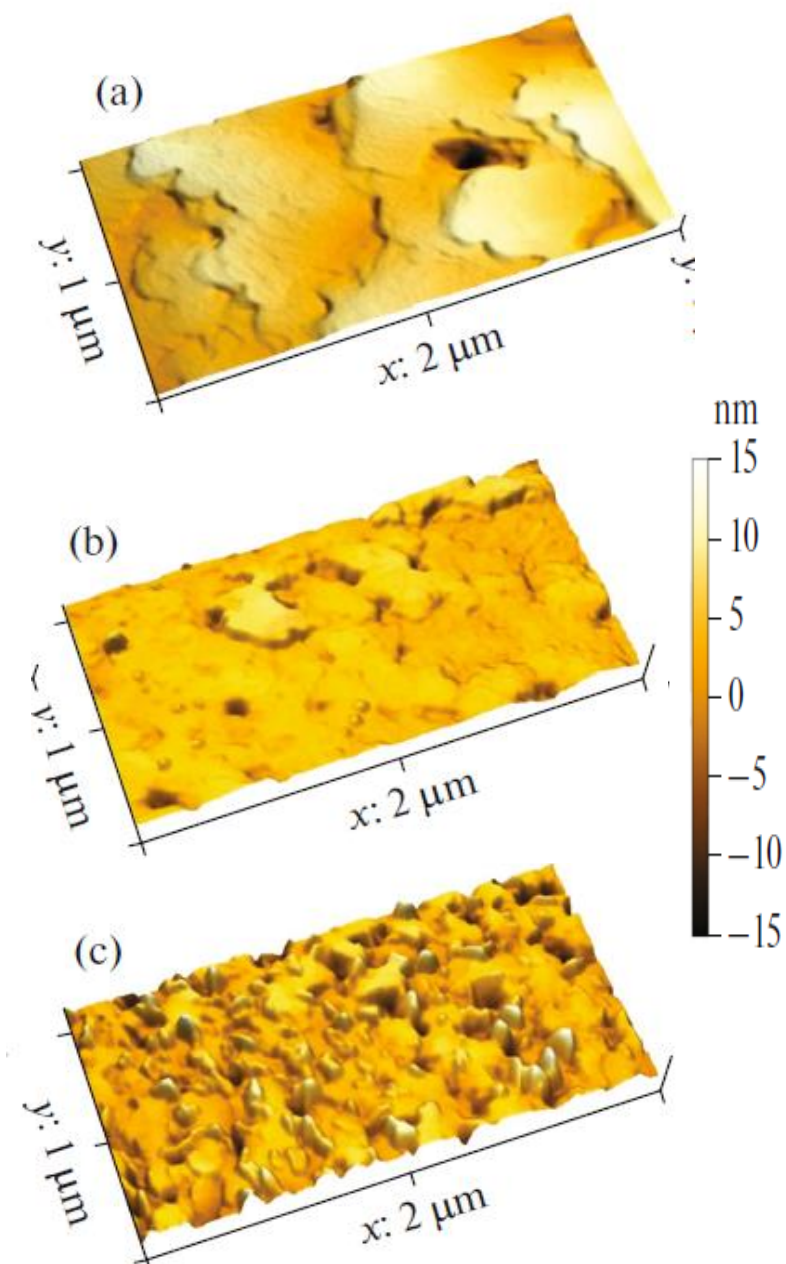
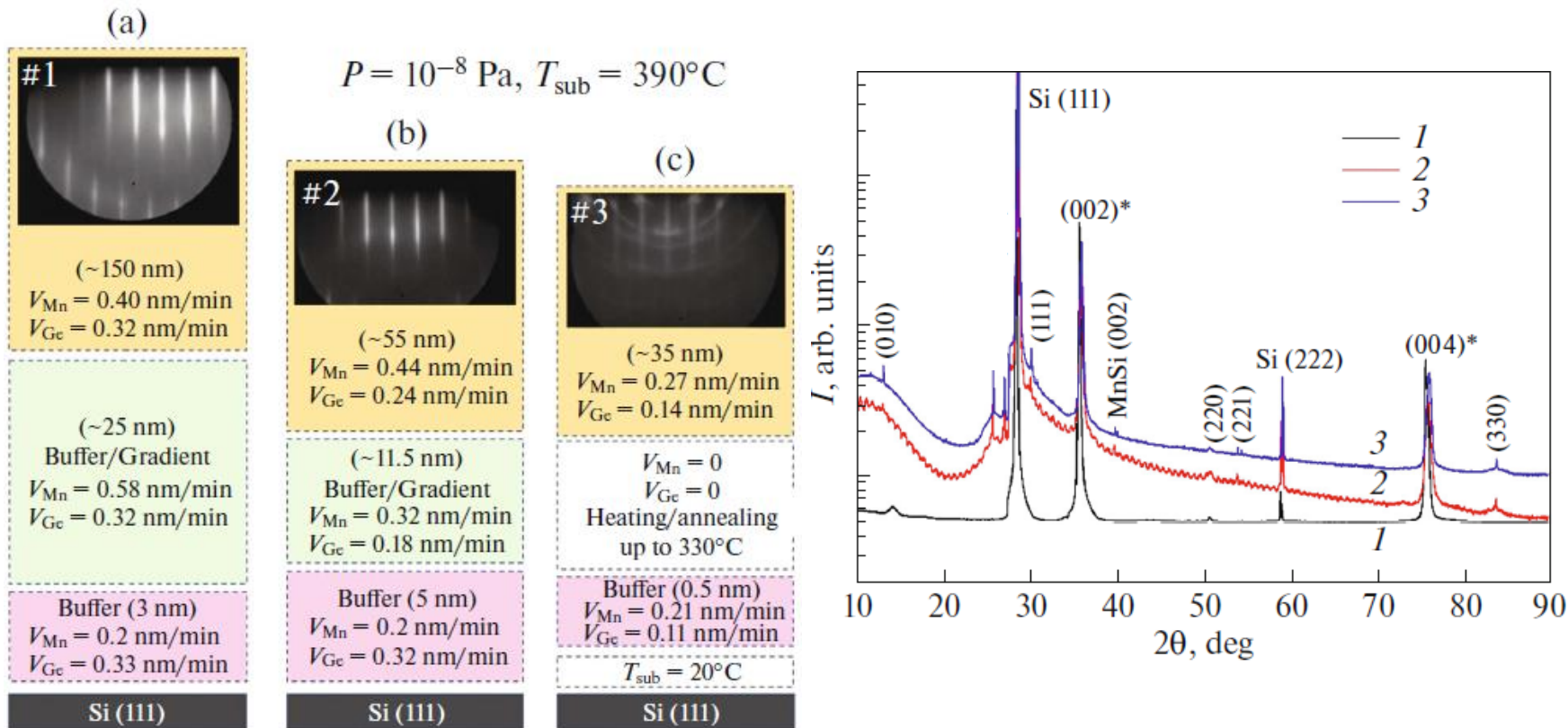
$T=390^\circ$
ДОБЭ



$T=400^\circ$
 $\text{Rms}(\text{Rq})=8.61 \text{ nm}$



Влияние буферного слоя на рост Mn_5Ge_3



буферный слой управляет морфологией плёнки и не ухудшает магнитные свойства

Кривые намагничивания $\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$

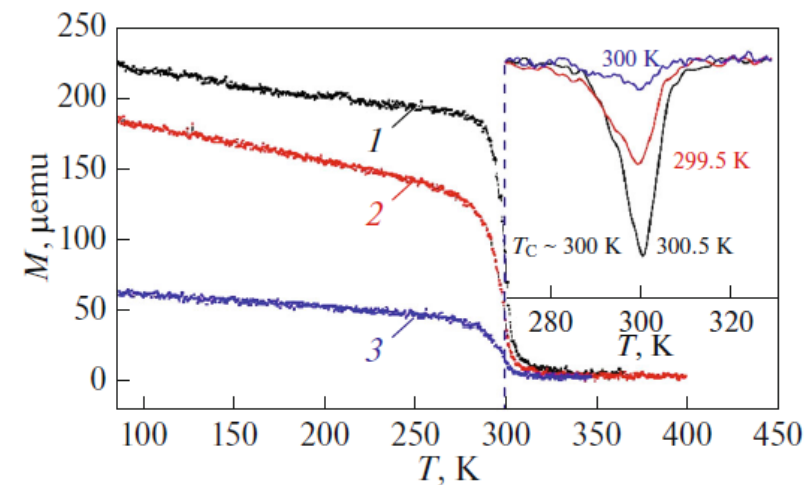


Fig. 5. Temperature dependences of magnetization $M(T)$ in a field of 100 Oe for three samples. The inset shows derivatives dM/dT .

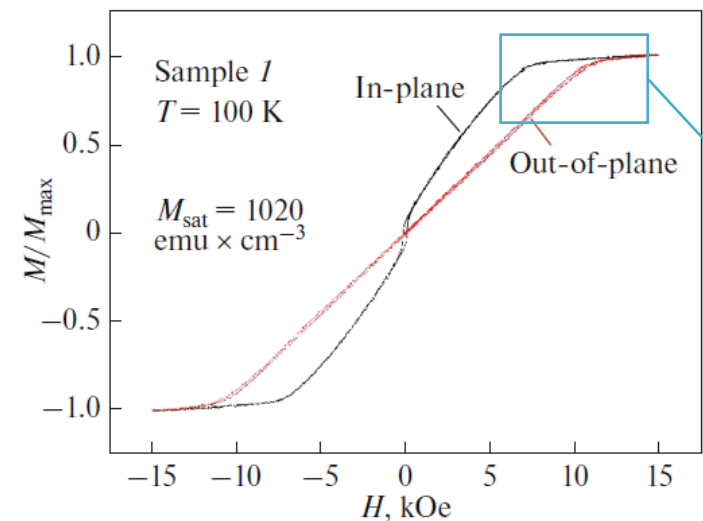
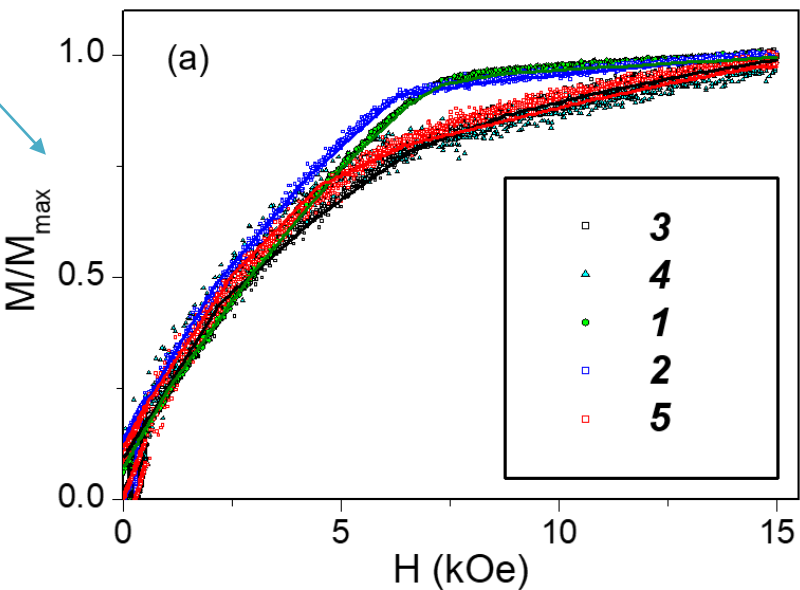


Fig. 6. Field dependences of magnetization $M(H)$ of sample 1 at a temperature of 100 K in a magnetic field parallel and perpendicular to the film plane.

изменение формы кривой намагничивания связано с неоднородностью толщины и рельефа пленок Mn_5Ge_3

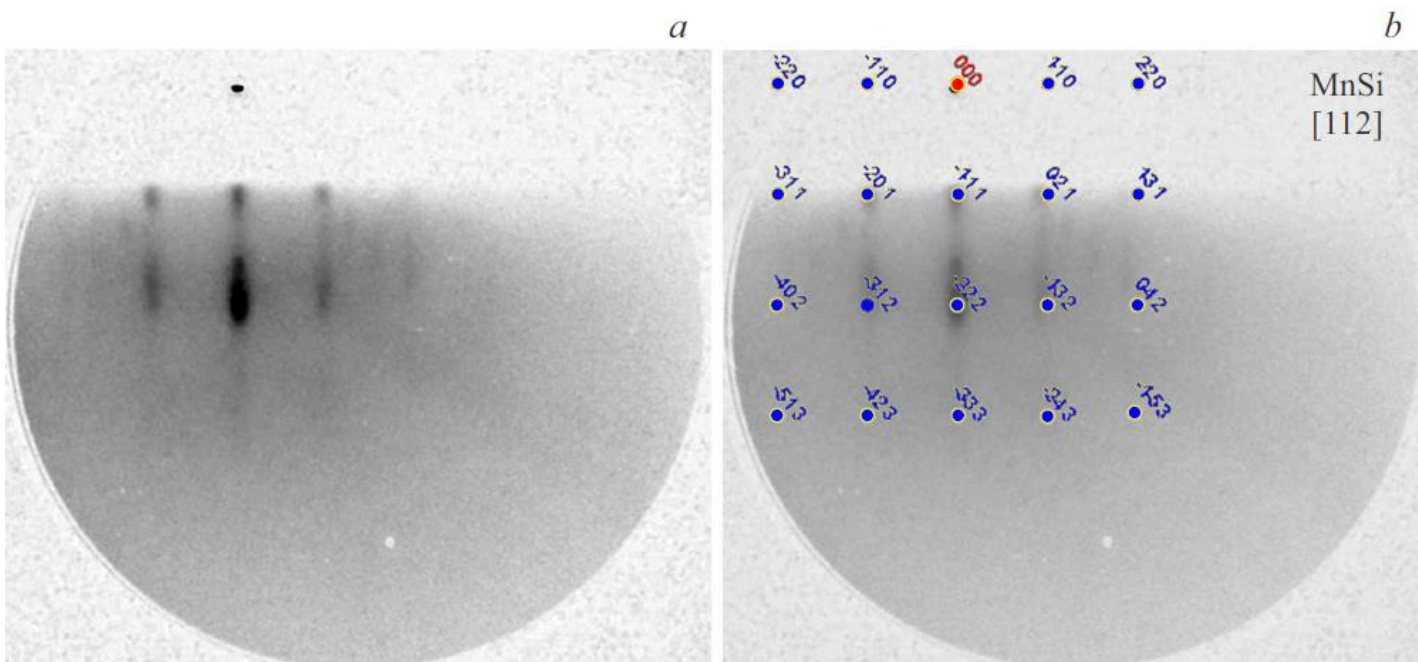


Неоднородность локальной толщины пленки приводит к неоднородности поля насыщения H_s

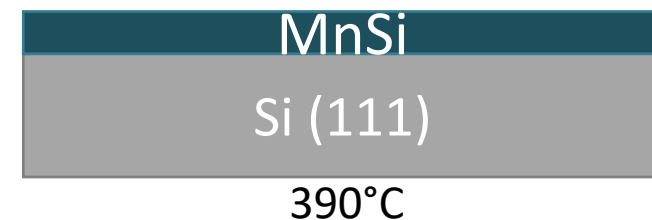
$$1 - \frac{H_s}{H_p} = 2\pi \sqrt{\frac{2A}{H_{op}M_s}} L^{-1} \left[1 + \frac{H_p}{4\pi M_s} \right]^{-1/2}$$

A – средняя шероховатость; B – размер кристаллитов; L – толщина						
Образец	A (нм)	B (нм)	L (нм)	A/L	B/L	$\delta H_s/H_s$
1	4.03	132	165	0.02	0.04	0.07
2	0.96	69	60	0.02	0.02	0.10
3	2.30	34	40	0.06	0.09	0.18
4	5.50	60	35	0.16	0.12	0.31
5	4.85	67	30	0.16	0.10	0.17

Исследование начальных этапов роста



0.5 нм

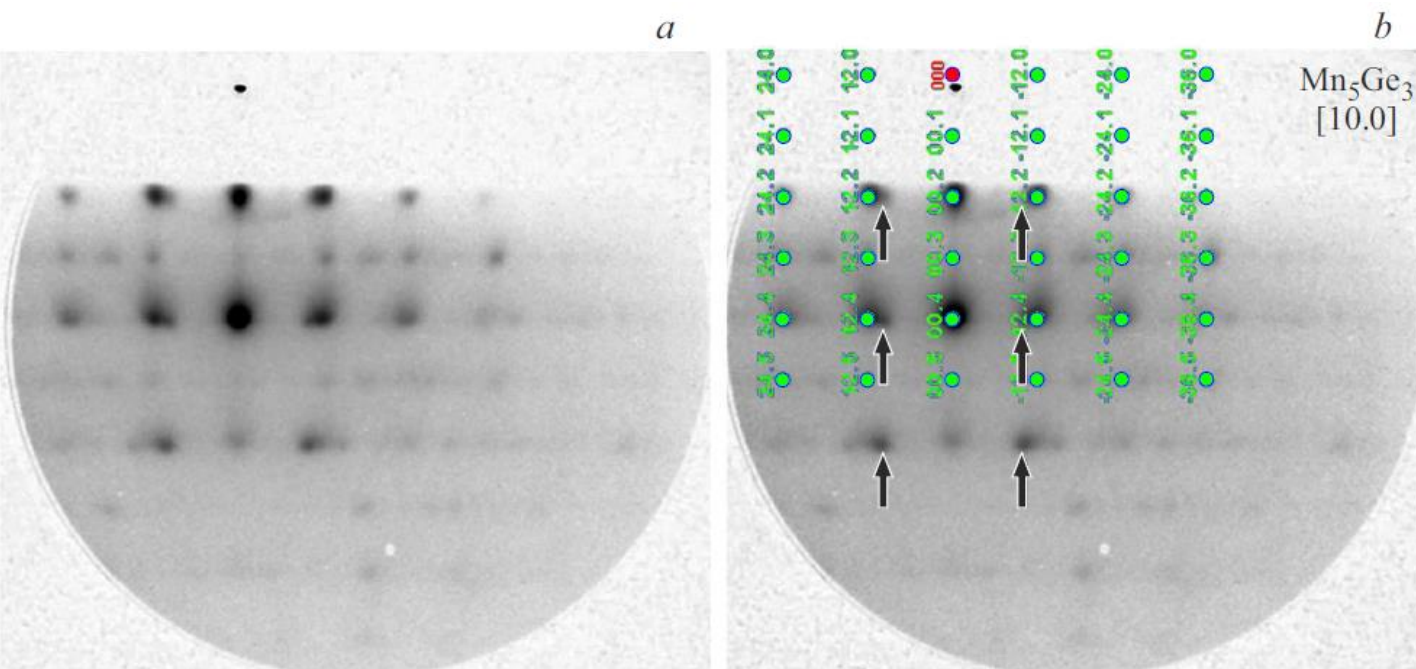


на начальном этапе происходит
формирование MnSi

Картинки ДОБЭ от слоя толщиной 0.5 нм, снятые в направлении падения пучка электронов $[11-2]_{\text{Si}(111)}$: *a* — экспериментальная;

b — совмещенная с расчетной для MnSi в направлении оси зоны $[112]_{\text{MnSi}}$.

Начальные этапы роста



2–7 нм

0.5 нм

$\text{MnSi} + \text{Mn}_5\text{Ge}_3 + ?$ фаза

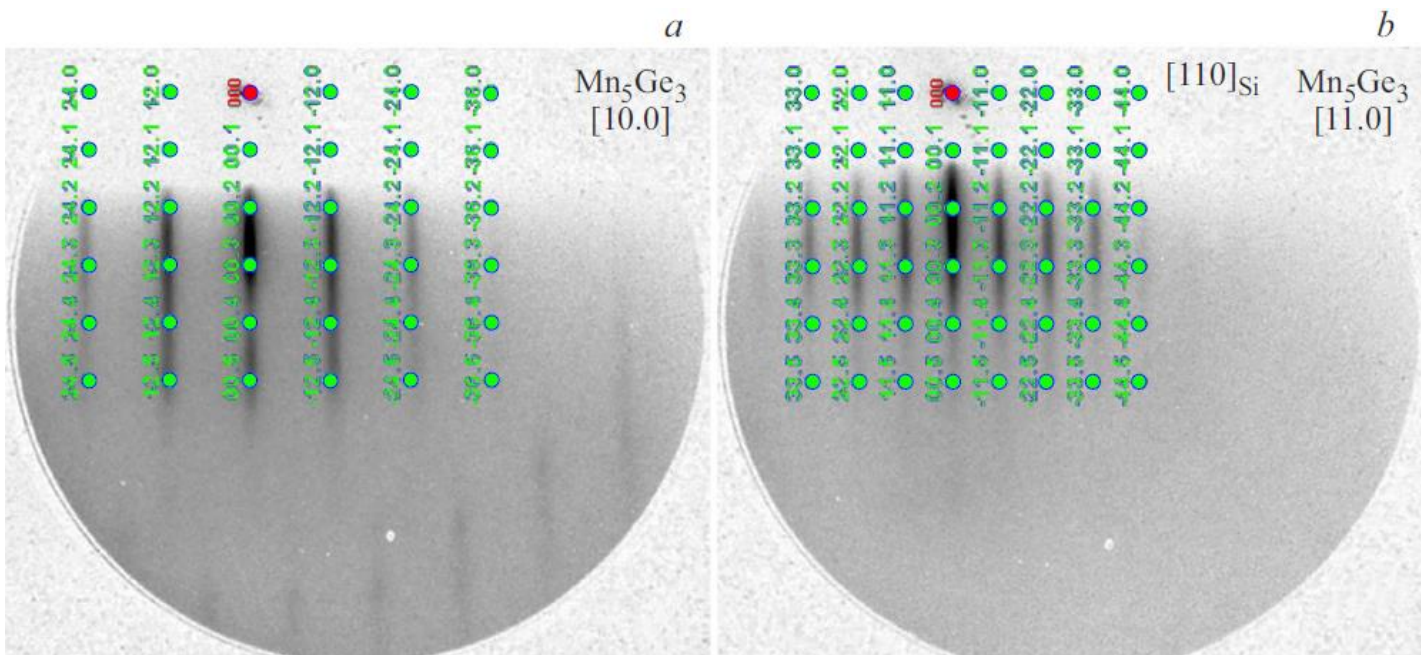
MnSi

Si (111)

$$a = 7.1 \text{ \AA}, c = 5.0 \text{ \AA}$$

Картини ДОБЭ от слоя толщиной 7 нм, снятые в направлении оси зоны $[11-2]_{\text{Si}}$:
а — экспериментальная; б — совмещенная с расчетной для Mn_5Ge_3 в направлении оси зоны $[11.0]_{\text{Mn}_5\text{Ge}_3}$ — точки; на ней же рефлексы от гексагональной структуры не установленного состава (стрелки). Зеленые цифры — индексы Миллера кристаллографических плоскостей, которым соответствуют представленные рефлексы на расчетной электронограмме.

Переход к монофазной плёнке



>10 нм

2–7 нм

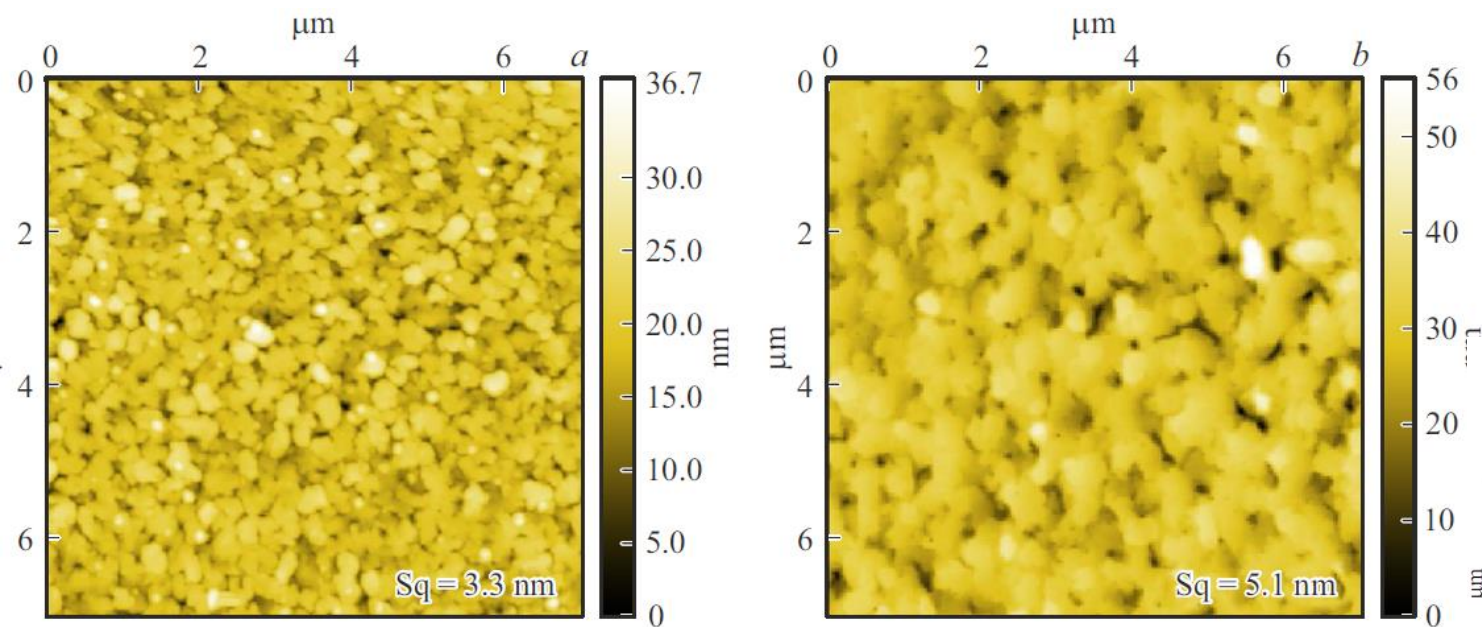
0.5 нм



Экспериментальные картины ДОБЭ от пленки Mn_5Ge_3 толщиной 30 нм и наложенные расчетные электронограммы для Mn_5Ge_3 , снятые в направлении падения пучка электронов: a — $[11-2]_{\text{Si}(111)}$; b — $[110]_{\text{Si}(111)}$.

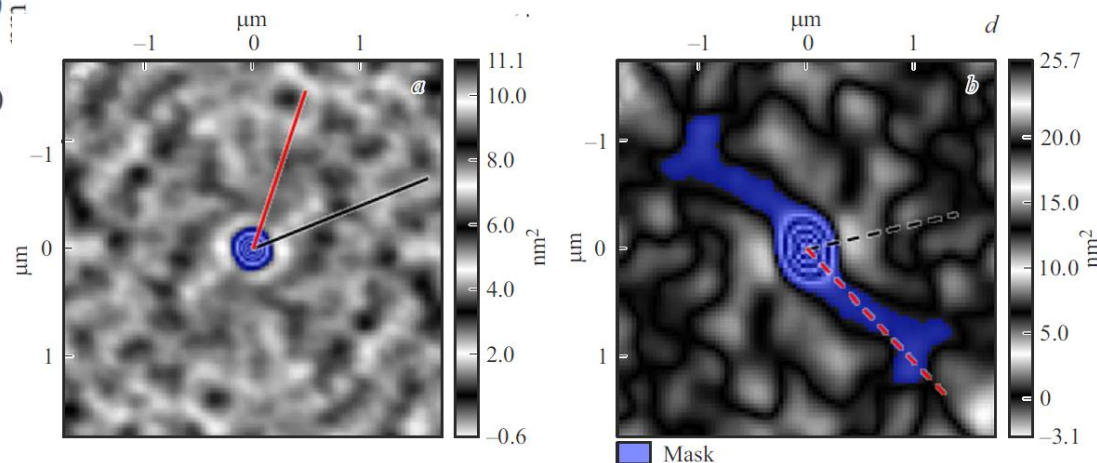
переход роста пленки от островкового к послойно-островковому с большими атомными террасами

Морфология поверхности $\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$



Данные АСМ для тонких пленок Mn_5Ge_3 , выращенных:
а — непосредственно на кремнии $\text{Si}(111)$ и б — на предварительно сформированном буферном слое.

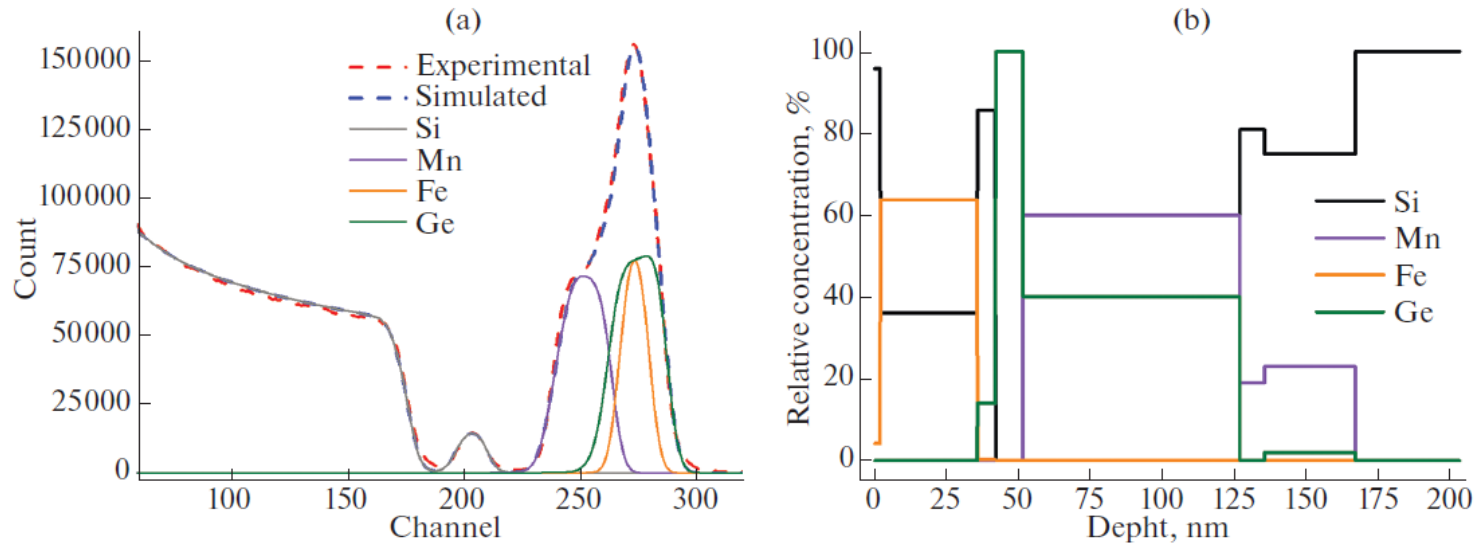
~30 нм



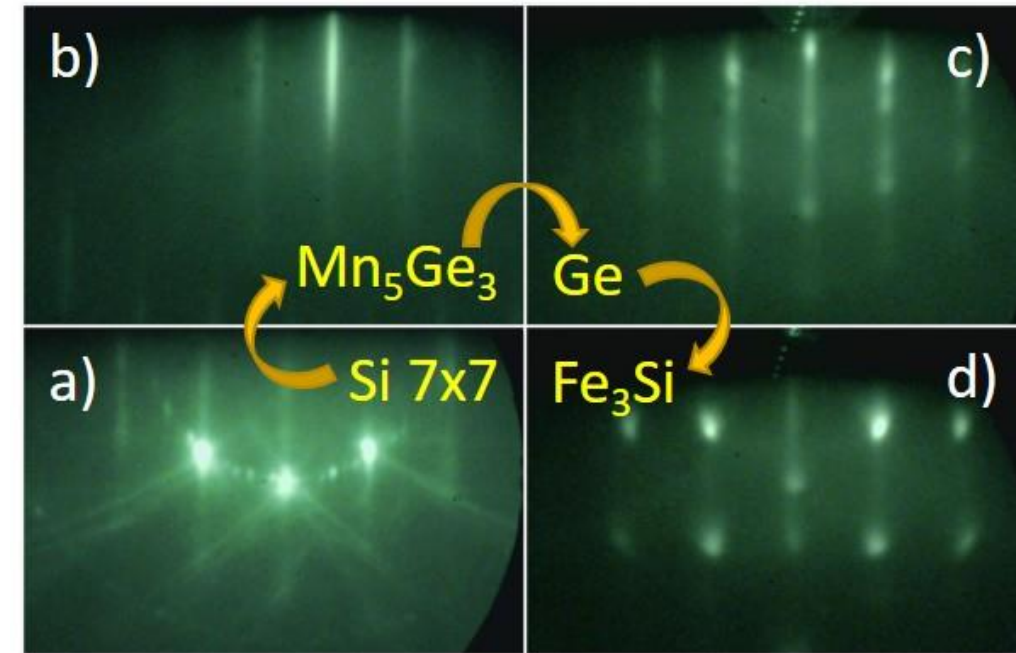
двумерная автокорреляционная функция (АКФ)

Рост на кремнии $\text{Si}(111)$. АКФ изотропна ($S_{\text{al}} \approx 118$ нм, $S_{\text{tr}} = 0,818$) → послойно-островковый
Рост на буферном слое. АКФ анизотропна ($S_{\text{al}} = 260$ нм / 1608 нм, $S_{\text{tr}} = 0,162$) → послойный

Гибридная структура $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}/\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$

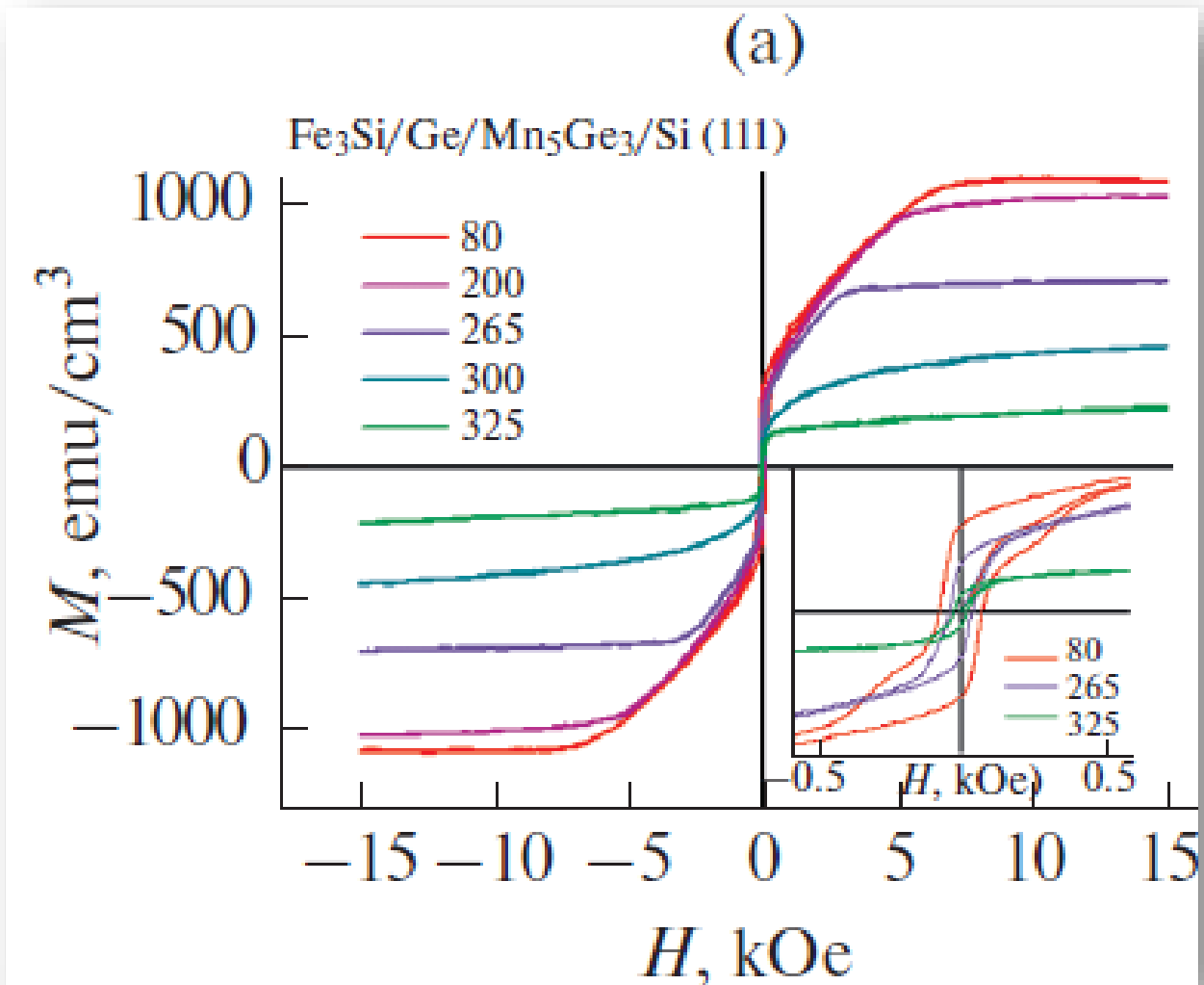


Экспериментальные и модельные спектры POP (а) и рассчитанный профиль глубины (б) образца $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}/\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$.



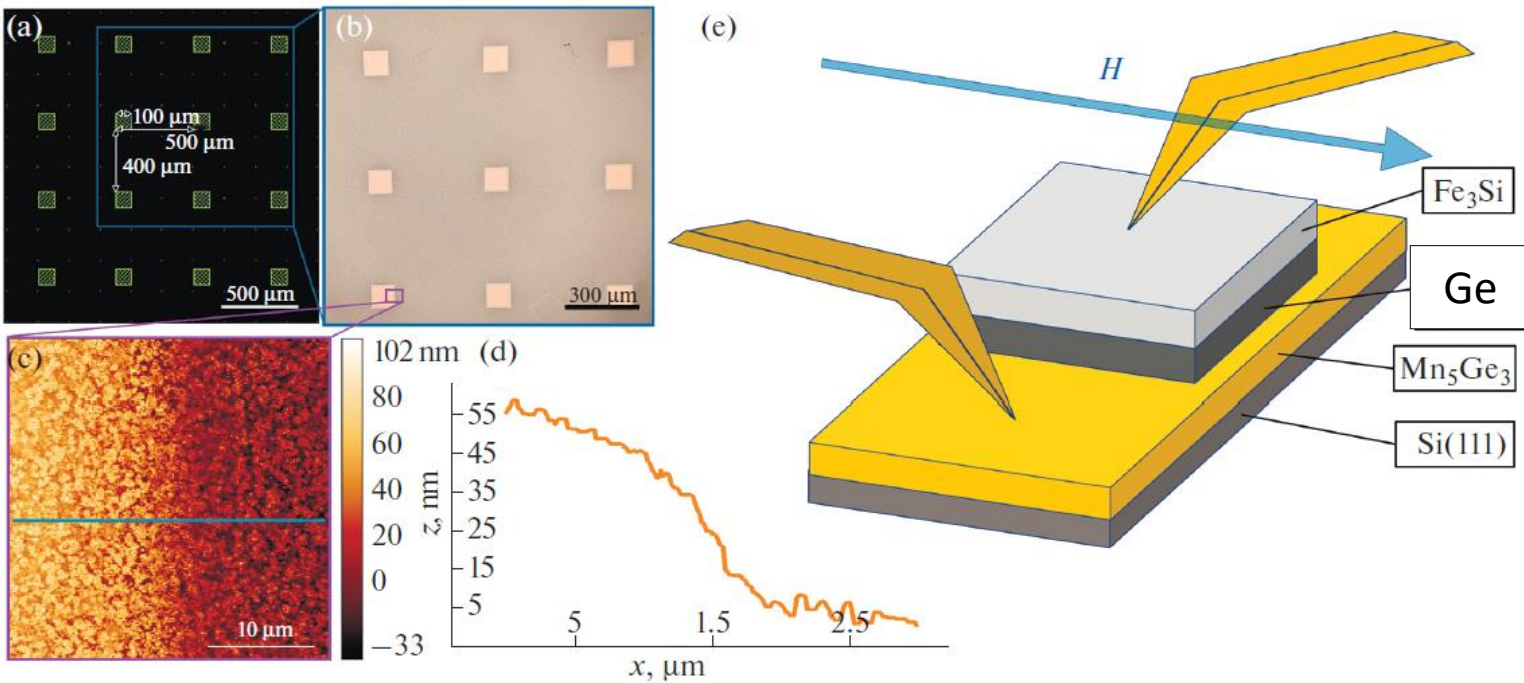
30 nm	Fe_3Si
11 nm	Ge
80 nm	Mn_5Ge_3
$\text{Si } (111)$	

Вертикальные гибридные структуры $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}/\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$

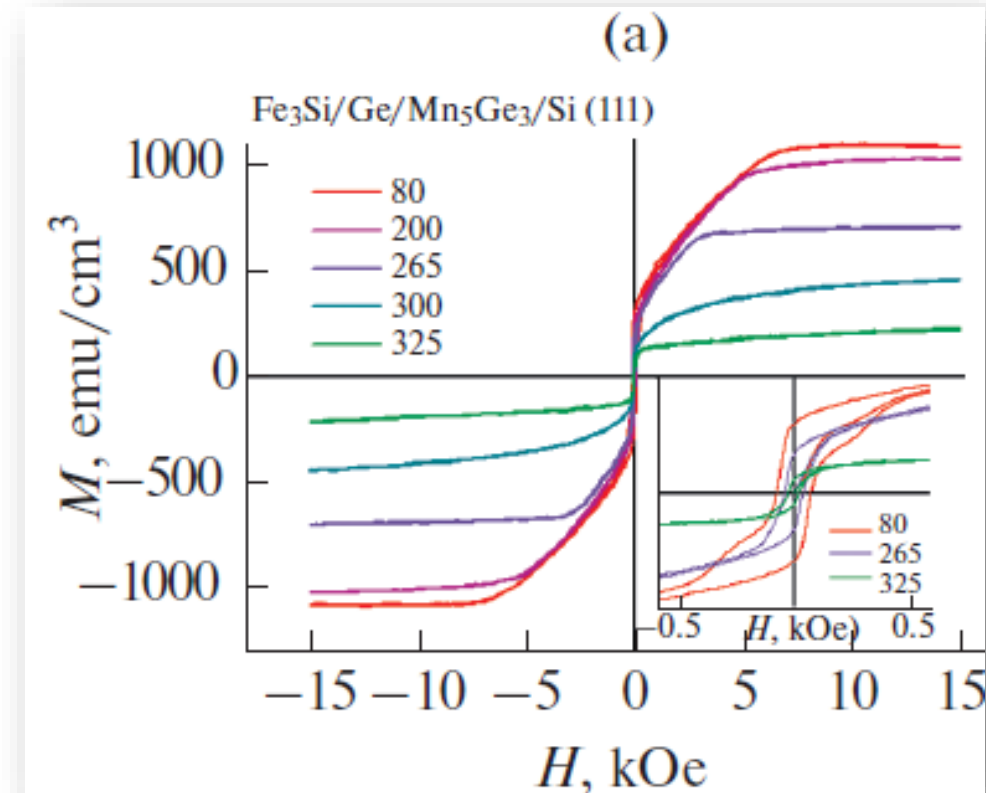


Зависимости намагниченности $M(H)$ для $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}/\text{Mn}_5\text{Ge}_3$

Вертикальные гибридные структуры $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}/\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$

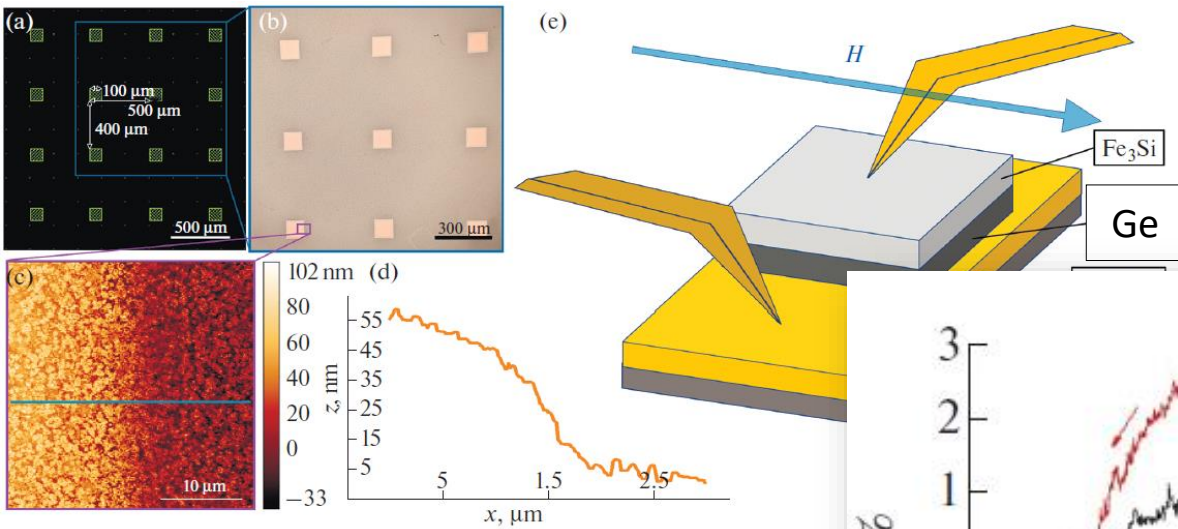


(а) Рисунок шаблона; (б) фотография вертикальных «столбиков» после травления и удаления маски; (в) изображение границы «столбика», полученное с помощью АСМ, и соответствующий (г) профиль поперечного сечения (вдоль синей линии на рисунке (в)). (д) Схема устройства и геометрия схемы измерений.

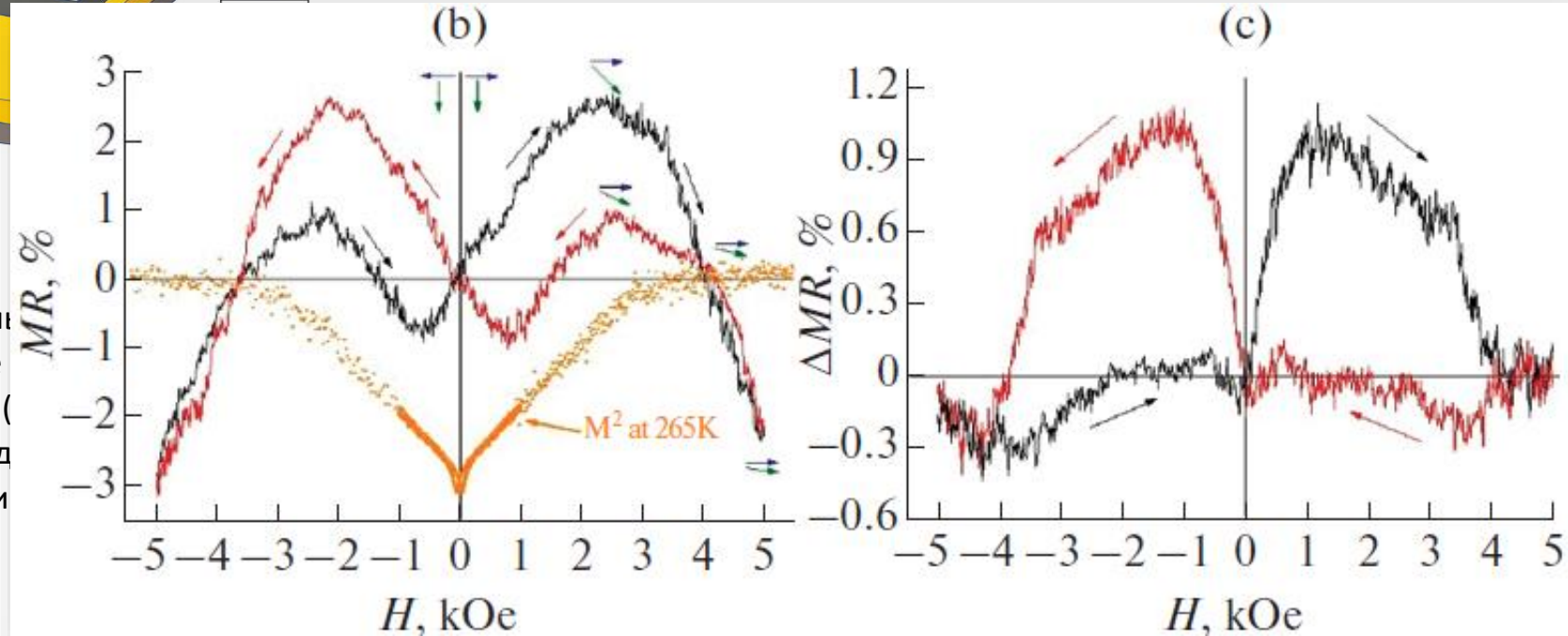


Кривые намагниченности для $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}/\text{Mn}_5\text{Ge}_3$

Вертикальные гибридные структуры $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}/\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$



(а) Шаблонный рисунок; (б) фотография вертикальной гибридной структуры после травления и удаления маски; (в) изображение, полученное с помощью АСМ, и соответствующий (г) профиль (вдоль синей линии на рисунке (в)). (д) геометрия схемы измерения



(б) полевые зависимости магнитосопротивления и квадрата намагниченности вертикальной гибридной структуры $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}/\text{Mn}_5\text{Ge}_3$. (в) Обработанный сигнал магнитосопротивления, включающий только гистерезисную часть.

Основные результаты

- ▶ Структурные и магнитные характеристики эпитаксиальных плёнок Mn_5Ge_3 на $\text{Si}(111)$ близки к параметрам объёмного монокристалла и превосходят значения, ранее сообщённые для плёнок Mn_5Ge_3 на других подложках.
- ▶ Обнаружен магнитокалорический эффект с максимальным изменением энтропии $|\Delta S| \approx 3,2 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, сопоставимым с эффектом в гадолинии. Показана анизотропия МКЭ, обусловленная конкуренцией анизотропии формы плёнки и магнитокристаллической анизотропии.
- ▶ Проведён анализ магнитного фазового перехода. Определены критические индексы ($\beta = 0,34$; $\gamma = 1,05$; $\delta = 3,82$). Отклонение индексов β и γ от модельных значений связано с анизотропией обменного взаимодействия, обусловленной наличием двух неэквивалентных позиций марганца в кристаллической решётке. Установлено, что буферный слой $\text{Mnx}(\text{Ge},\text{Si})\text{y}$ является эффективным инструментом контроля морфологии плёнок, не оказывая влияния на магнитные свойства. Показано, что форма кривых намагничивания определяется неоднородностью толщины и рельефом поверхности.
- ▶ Исследованы начальные этапы роста. Установлено, что на интерфейсе последовательно формируются фазы MnSi и Mn_5Ge_3 и при использовании буферного слоя реализуется послойный эпитаксиальный механизм роста.
- ▶ Созданы вертикальные спин-вентильные структуры $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Ge}/\text{Mn}_5\text{Ge}_3$ на подложках $\text{Si}(111)$. Исследованы их магнитотранспортные свойства и продемонстрирован эффект спинового вентиля, что подтверждает совместимость германида марганца с кремниевой технологией и перспективность его использования в спинтронных устройствах.

Спасибо за внимание!

Андрющенко Т. А.

Бондарев И. А.

Бондарев М. А.

Варнаков С. Н.

Волков Н. В.

Гойхман А. Ю.

Ерёмин Е. В.

Комогорцев С. В.

Максимов К. Ю.

Молокеев М. С.

Овчинников С. Г.

Рауцкий М. В.

Соболев И.А.

Соловьёв Л. А.

Сухачёв А. Л.

Тарасов А. С.

Тарасов И. А.

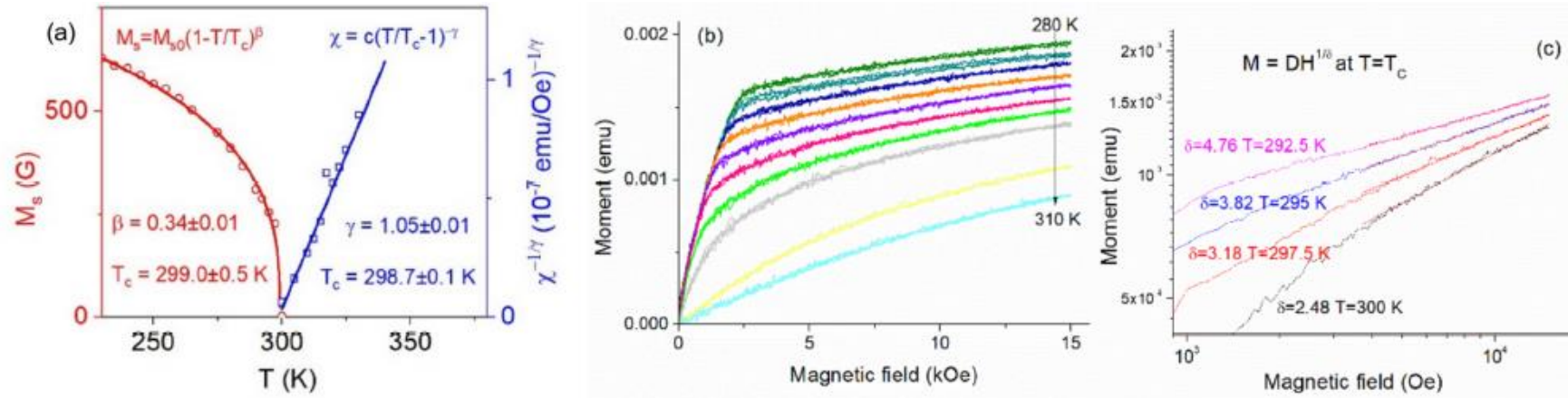
Шанидзе Л. В.

Яковлев И. А.

Список публикаций

1. Tarasov, A.S., Komogortsev, S.V., Lukyanenko, A.V. I. A. Yakovlev, I. A. Tarasov, A. L. Sukhachev, M. V. Rautskii, L. A. Solovyov, T. A. Andryushchenko, I. A. Bondarev, S. N. Varnakov & N. V. Volkov. **Structure, magnetic and magnetocaloric properties of the Mn₅Ge₃ thin film grown on Si(111)**. Journal of Materials Science. 2024. Vol. 59. P. 9423–9436. (Scimago Q1 WOS Q1, BC1)
2. M. V. Rautskii, A. V. Lukyanenko, S. V. Komogortsev, I. A. Sobolev, L. V. Shanidze, I. A. Bondarev, M. A. Bondarev, E. V. Eremin, I. A. Yakovlev, A. L. Sukhachev, M. S. Molokeev, L. A. Solovjov, S. N. Varnakov, S. G. Ovchinnikov, N. V. Volkov, and A. S. Tarasov. **Buffer Layer Effect on the Structure, Morphology, and Magnetic Properties of Mn₅Ge₃ Films Synthesized on Si(111) Substrates**. Physics of Metals and Metallography, 2024, Vol. 125, No. 12, pp. 1327–1336. (Scimago Q3, WOS Q3, BC2)
3. A. V. Lukyanenko, L. V. Shanidze, M. V. Rautskii, I. A. Yakovlev, A. L. Sukhachev, K. Yu. Maksimov, A. Yu. Goikhman, N. V. Volkov, and A. S. Tarasov. **Magnetoresistive Effect in Vertical Fe₃Si/Ge/Mn₅Ge₃/Si(111) Hybrid Structures**. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2024, Vol. 88, Suppl. 1, pp. S42–S46. (Scimago Q3, BC3)
4. И.А. Яковлев, А.В. Лукьяненко, А.С. Тарасов, С.Н. Варнаков. **Исследование методом ДОБЭ начальных этапов эпитаксиального роста Mn₅Ge₃ на Si(111)**. Физика твердого тела, 2025, том 67, вып. (RSCI, BC2)
5. Tarasov A. S., Komogortsev S. V., Rautskii M. V., Lukyanenko A. V., Sukhachev A. L., Yakovlev I. A. **Magnetic phase transition in Mn₅Ge₃ (001) film on Si (111)** //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2025. – С. 173467. 5 (Scimago Q2, WOS Q2, BC1)

Магнитный фазовый переход. Критические индексы



(a) Температурные зависимости намагниченности насыщения и парамагнитной восприимчивости $M_s(T)$ и $\chi(T)$, рассчитанные по изотермам намагниченности $M(T)$ (b). (c) $M(T)$ для температур, близких к T_c , построенная в логарифмическом масштабе для определения δ

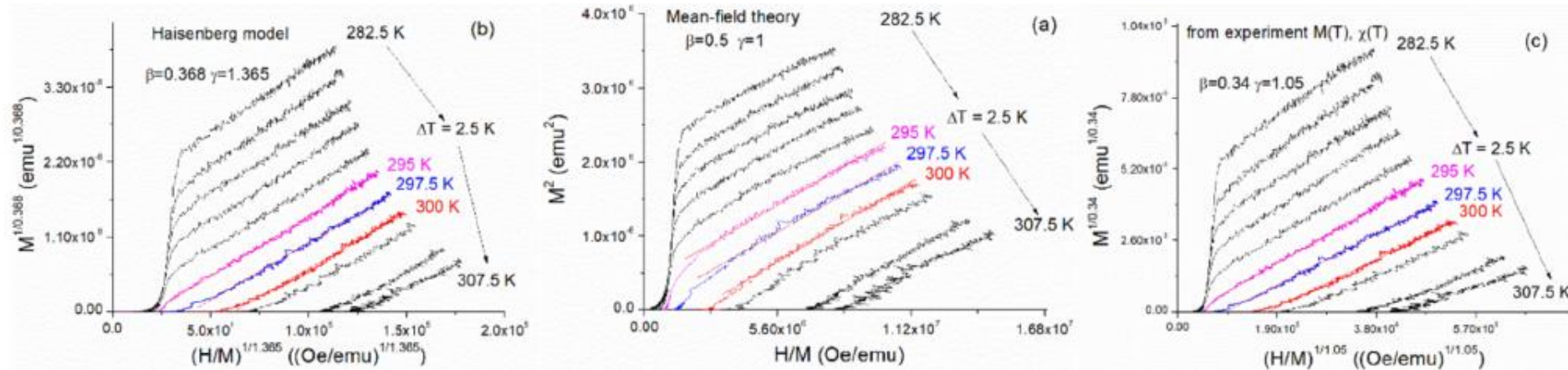
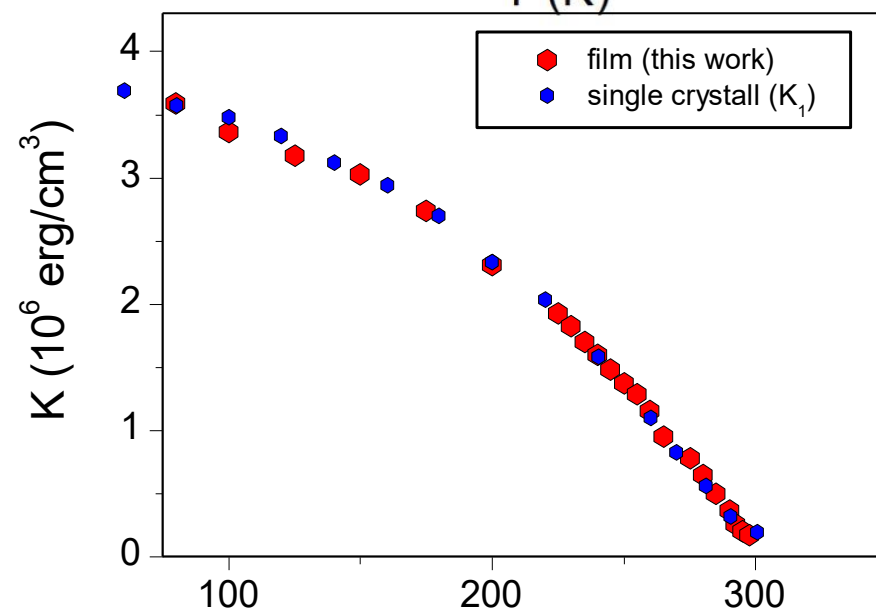
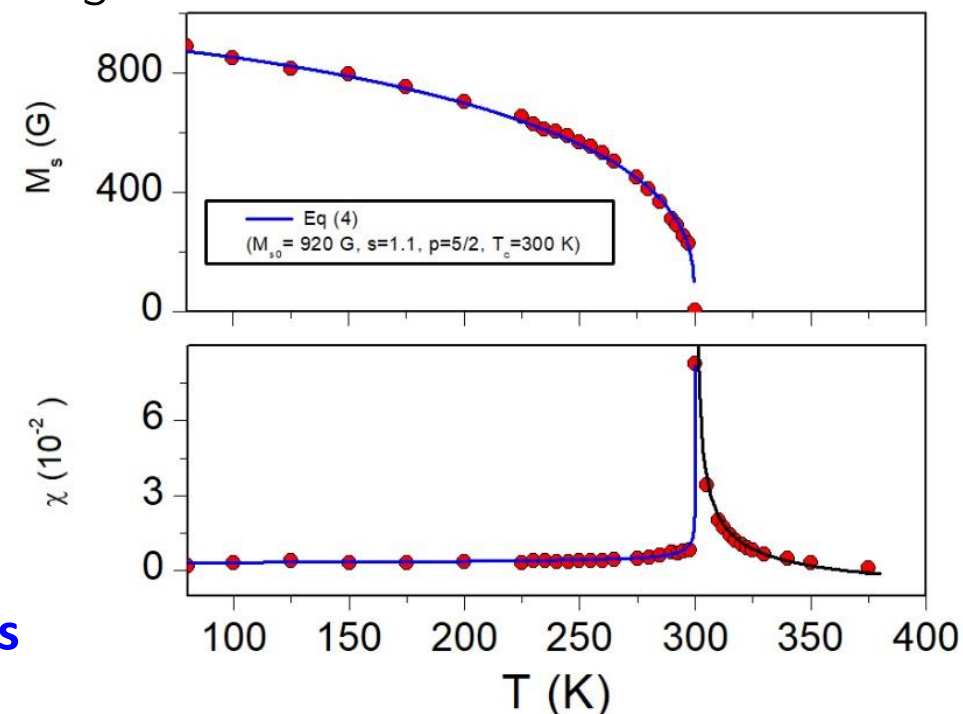
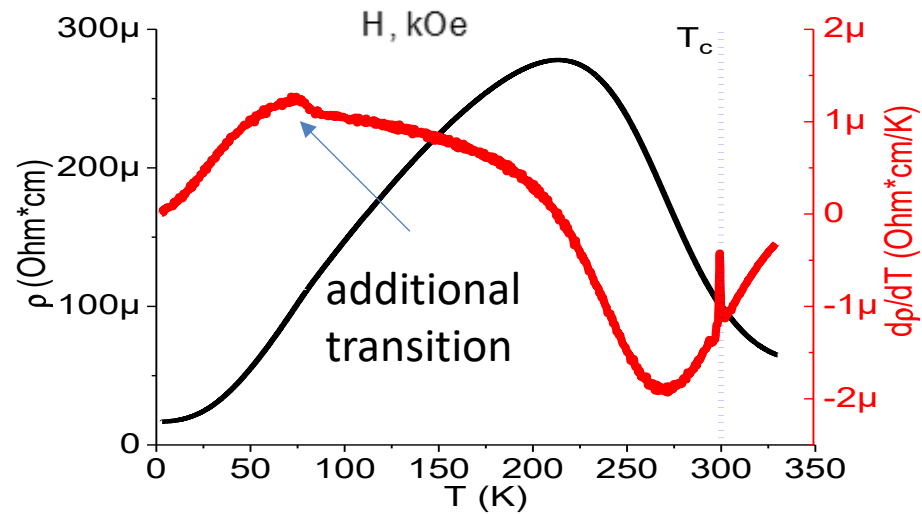
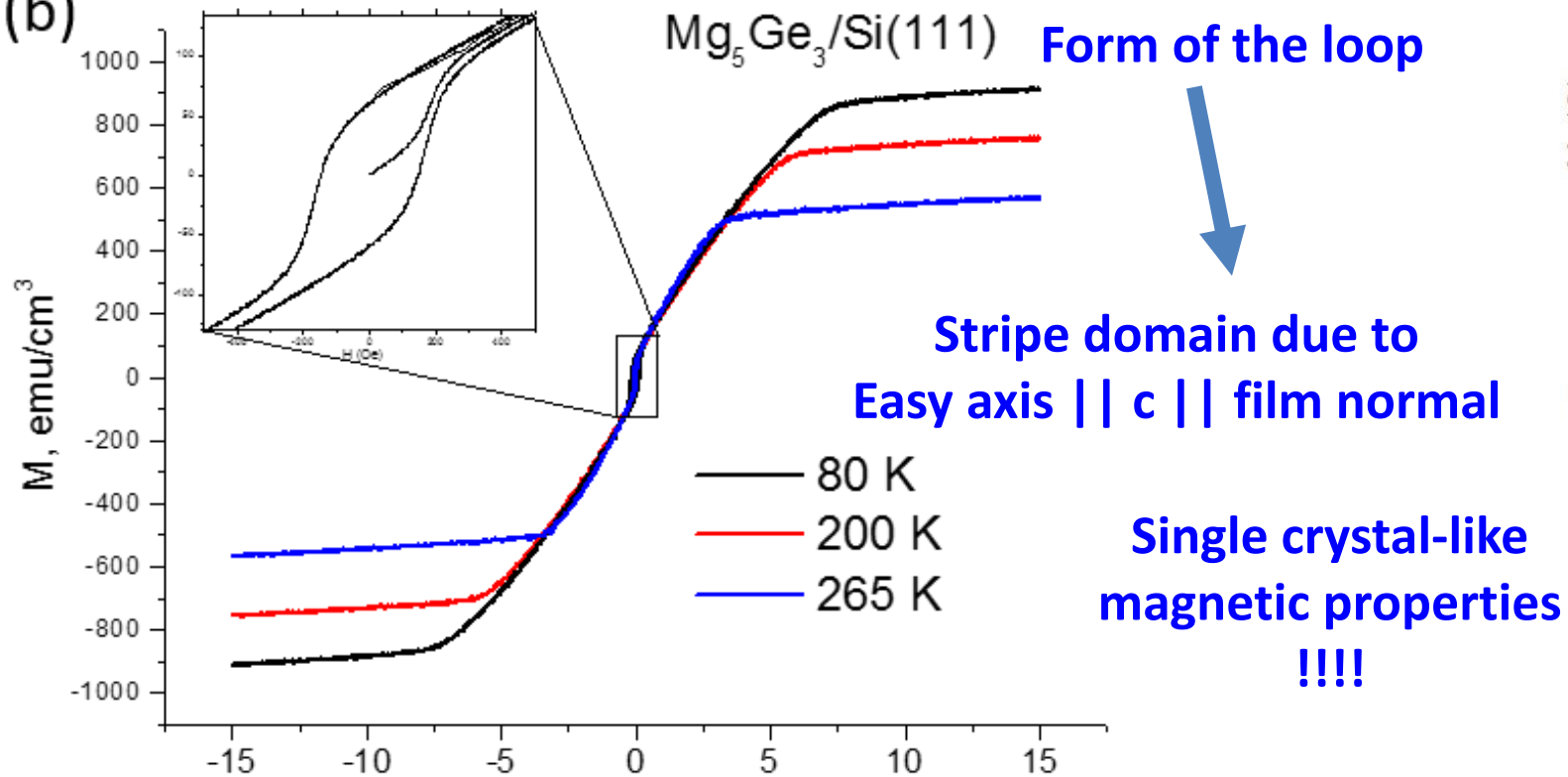


График Аррота (a), график Аррота-Ноукса (b) и модифицированный график (c) для различных β и γ



Магнитные свойства $\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$

(b)

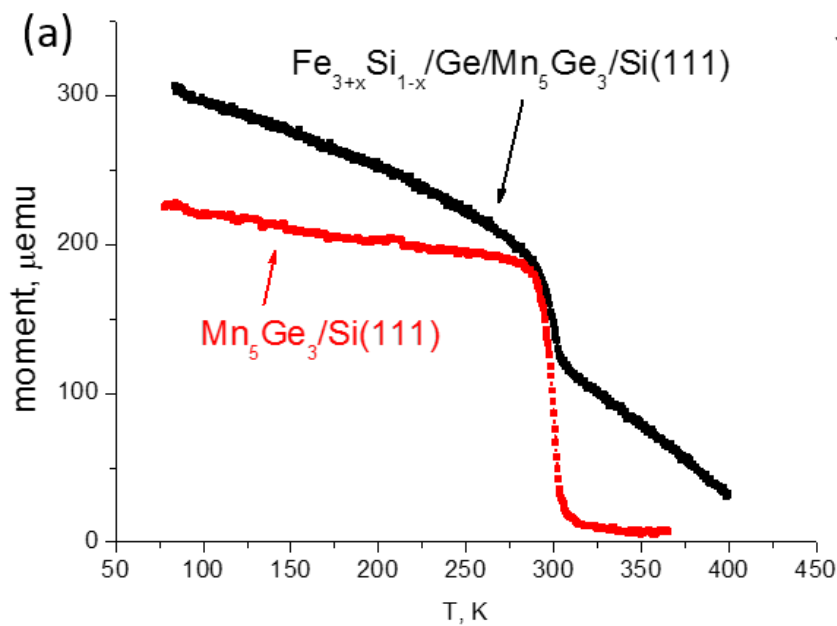




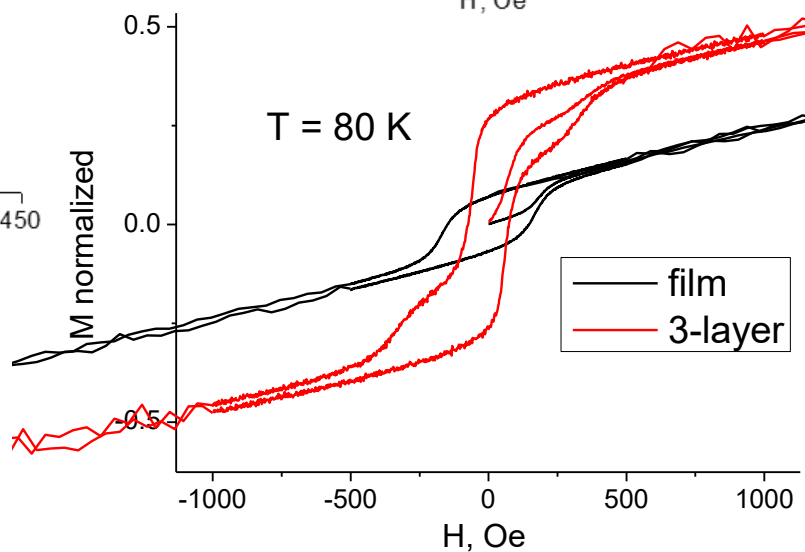
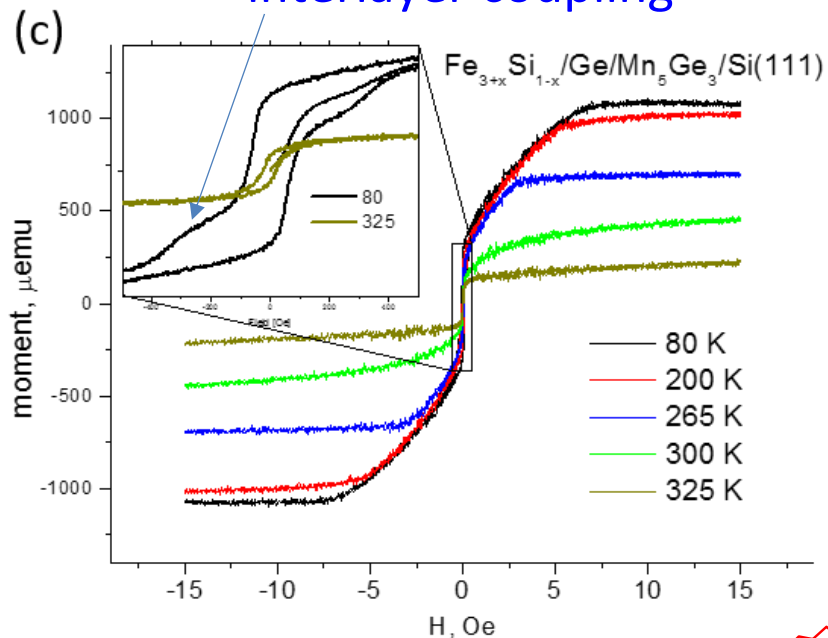
Магнитные и транспортные свойства $\text{Fe}_{3+x}\text{Si}_{1-x}/\text{Ge}/\text{Mn}_5\text{Ge}_3/\text{Si}(111)$

Sum of two loops or
interlayer coupling

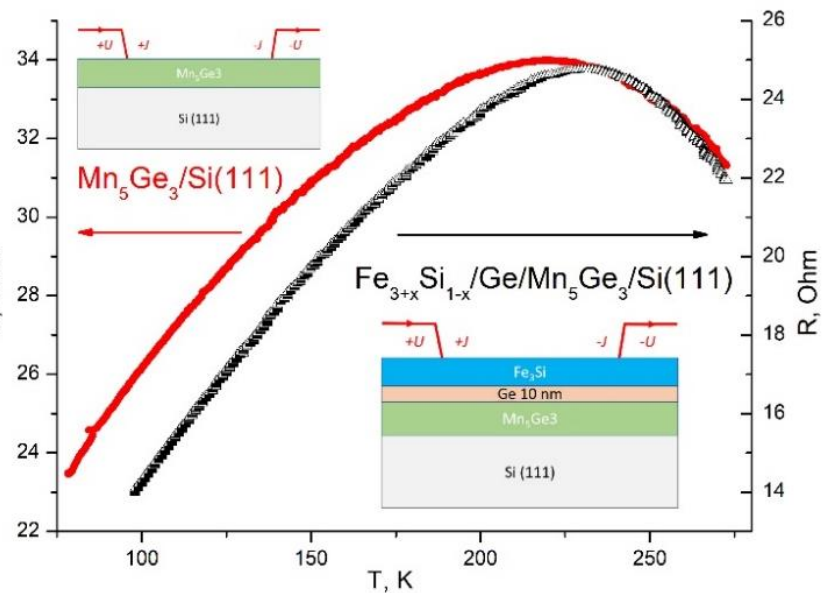
Unchanged magnetic
properties of Mn_5Ge_3



Buffer layer is good
diffusion barrier



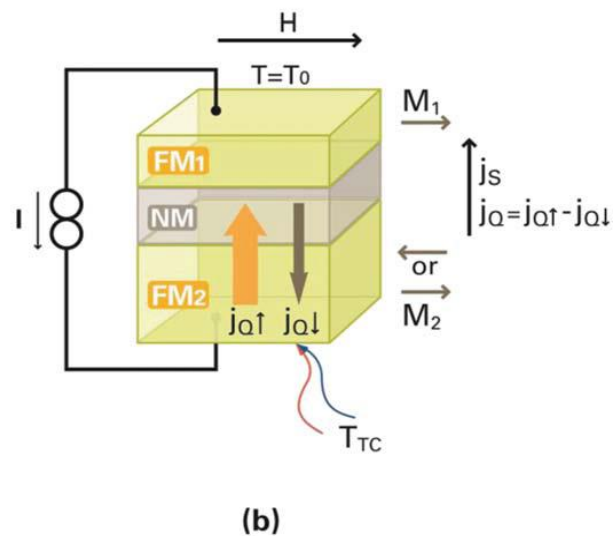
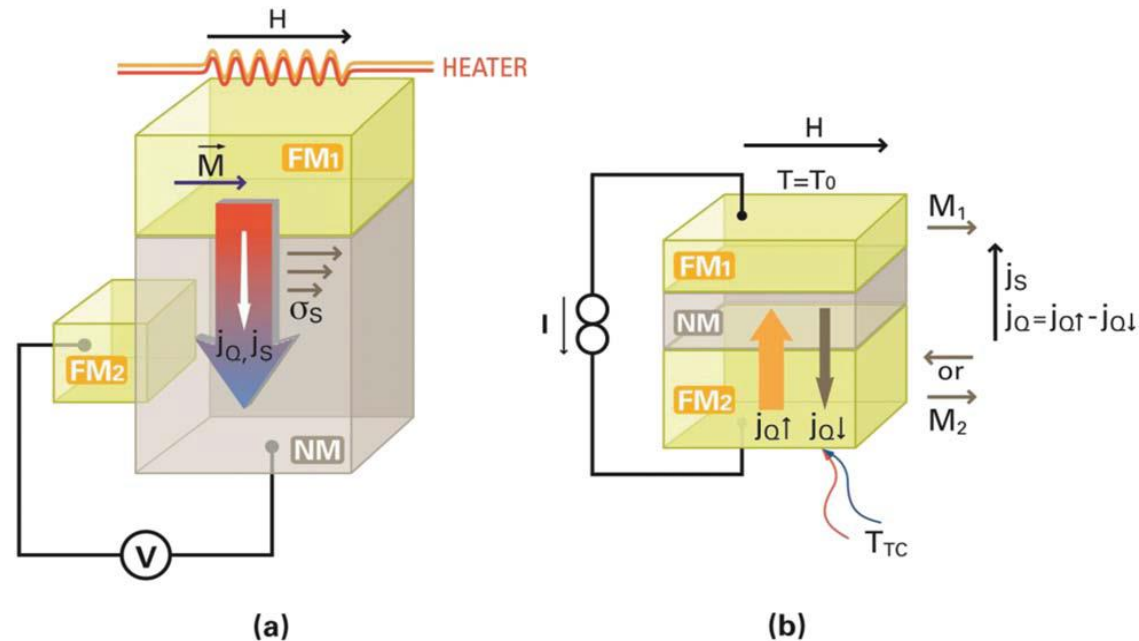
Current channel switching
effect



$p=10^{18} \text{ 1/cm}^3$ ($\rho = 20\text{-}40 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$)

[2]

... термическая спиновая накачка обеспечивает доступ к гораздо более высокому энергетическому режиму (и, следовательно, к более высокой плотности спинового тока), чем обычно достигается с помощью традиционных методов электрической или ФМР-инжекции.



(а) Схема измерения прямой тепловой спиновой инжекции из ФМ проводника посредством спин-зависимого эффекта Зеебека. Тепловой ток j_Q проходит от FM1 к NM, разница между коэффициентами Зеебека электронов со спином вверх и спином вниз в FM1 приводит к спиновому току j_S , параллельному j_Q . Этот спиновый ток детектируется нелокально как напряжение между NM и FM2.

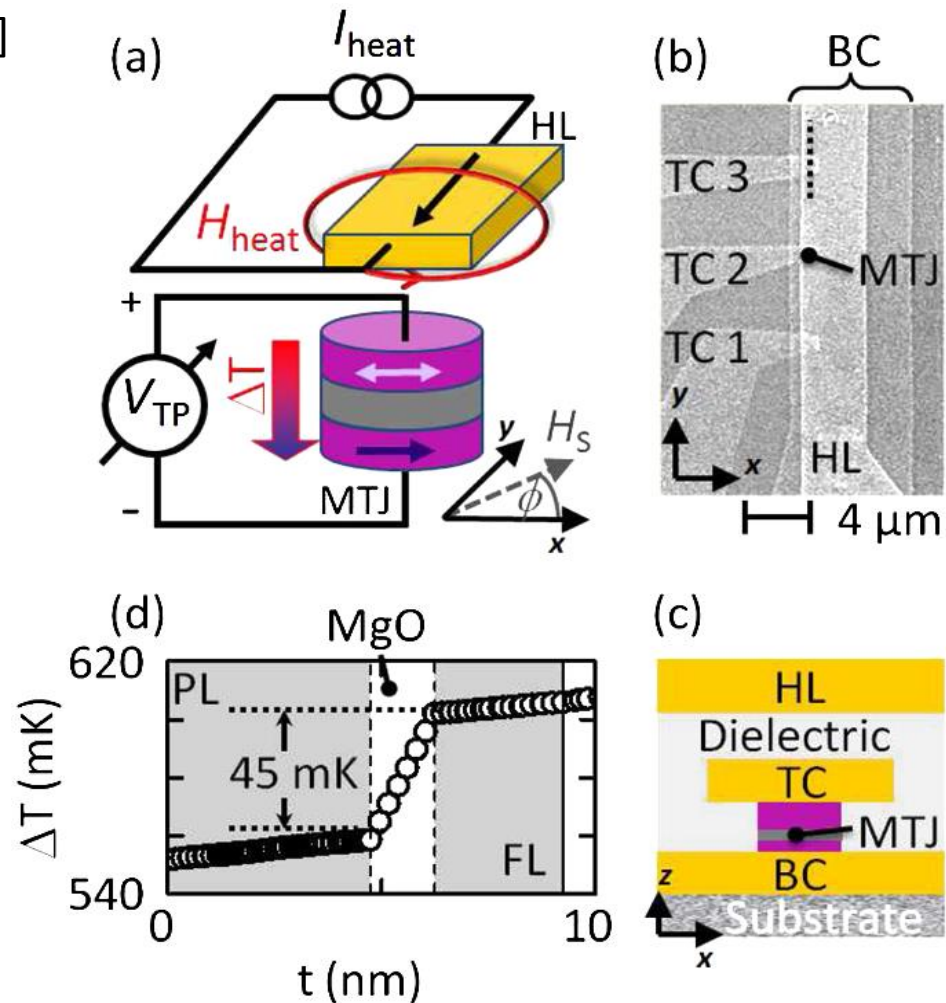
(б) обратный процесс, спин-зависимый эффект Пельтье. Через устройство проходит зарядный ток, и соответствующий тепловой поток может модулироваться изменением направления намагниченности FM2.

Mn5Ge3 обладает потенциалом в качестве материала для спиновой калоритроники [1,2] в многослойных наноструктурах [3], выступая в качестве кандидата для генерации температурных градиентов и/или спиновых токов для облегчения реализации спин-зависимых термоэлектрических эффектов [4-R].

Спиновая калоритроника использует объединенные перспективы спин-зависимого электронного и теплового транспорта для изучения взаимодействия между спиновыми и тепловыми токами в материалах, как дополнение к устоявшимся областям спинтроники и термоэлектричества.

- 1) <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.054403>
- 2) <https://doi.org/10.1039/C3EE43299H>
- 3) <https://doi.org/10.1038/nmat3301>
- 4) <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.044037>
- 5) <https://doi.org/10.1038/nmat3076>
- 6) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.177201>

[6]



(a) Схема измерения туннельного магнитотермоэнергетического эффекта (ТМТР). Ток I_{heat} , проходящий через HL, создает температурный градиент по всему MTJ, а термонапряжение V_{TP} измеряется в плоскостных магнитных полях H_s . (b) Электронная микрофотография типичного устройства с HL, BC и верхними контактами (TC1-TC3) к трем наностолбикам. Положение наностолбика MTJ под TC2 отмечено. (c) Схема поперечного сечения контактной и слоистой структуры вдоль пунктирной линии на рисунке (b). (d) Смоделированная температура для $P_{\text{heat}} = 60$ мВт в MTJ как функция толщины t . $t = 0$ соответствует нижней границе самого нижнего слоя CoFeB.

Mn₅Ge₃ обладает потенциалом в качестве материала для спиновой калоритроники [1,2] в многослойных наноструктурах [3], выступая в качестве кандидата для генерации температурных градиентов и/или спиновых токов для облегчения реализации спин-зависимых термоэлектрических эффектов [4-R].

- 1) <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.054403>
- 2) <https://doi.org/10.1039/C3EE43299H>
- 3) <https://doi.org/10.1038/nmat3301>
- 4) <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.044037>
- 5) <https://doi.org/10.1038/nmat3076>
- 6) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.177201>