

УДК 537.6

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-398-405

Для цитирования: Яковлев И. А. Сравнение магнитной анизотропии поликристаллической и монокристаллической пленок Fe_3Si // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 398–405. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-398-405.

For citation: Yakovlev I. A. The magnetic anisotropy comparison of polycrystalline and single-crystal Fe_3Si films. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 2, P. 398–405. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-398-405.

Сравнение магнитной анизотропии поликристаллической и монокристаллической пленок Fe_3Si^*

И. А. Яковлев

Институт физики имени Л. В. Киренского СО РАН –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38
E-mail: yia@iph.krasn.ru

Постоянное совершенствование высокотехнологичных приборов требует от науки постоянно развития технологий и поиска новых материалов. На сегодняшний день развитие области магнетизма достигло очень широких знаний, что позволило создать и изучить множество искусственных ферромагнитных материалов, которые уже сейчас активно применяются в науке и технике. Последние научные знания показывают, что один и тот же материал в различном состоянии может проявлять разные электрические, магнитные свойства. Так в современных приборах активно применяются тонкие магнитные пленки. Физические процессы в тонких пленках протекают иначе, чем в массивных материалах. В результате пленочные элементы имеют характеристики, отличные от характеристик массивных образцов и позволяют наблюдать эффекты, не свойственные массивным образцам. Пленка – это тонкий слой связанного конденсированного вещества, толщина которого сравнивается с расстоянием действия поверхностных сил; представляет собой термодинамически стабильную или метастабильную часть гетерогенной системы «пленка – подложка». Дальнейшее изучение пленочных структур привело к созданию и исследованию многослойных магнитных систем. В таких структурах возможно присутствие как слоёв различных ферромагнитных материалов, так и неферромагнитных прослоек, а свойства многослойных систем могут значительно отличаться от свойств любого из компонентов системы. Для практики эти материалы также имеют множество применений, в том числе, радиосвязь и геологоразведка. В нашем эксперименте методом молекулярно-лучевой эпитаксии при совместном осаждении Fe и Si синтезированы ферромагнитные тонкие пленки силицида Fe_3Si . На подложке $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$ была получена поликристаллическая пленка силицида, а на $\text{Si}(111)7\times 7$ – монокристаллическая. Структура была исследована с помощью дифракции отраженных быстрых электронов непосредственно в процессе роста. Методом ферромагнитного резонанса была изучена магнитная анизотропия полученных образцов. Установлено, что поликристаллическая пленка характеризуется одноосной магнитной анизотропией, которая составляет 13.42 Э и формируется в следствие «косого» напы-

* Автор статьи выражает благодарность Беляеву Борису Афанасьевичу (ИФ СО РАН) за проведенные измерения на сканирующем спектрометре ферромагнитного резонанса.

The author expresses his gratitude to Boris Afanasyevich Belyaev (Kirensky Institute of Physics SB RAS) for the measurements performed on a scanning ferromagnetic resonance spectrometer.

ления. А магнитная анизотропия для монокристаллической пленки Fe_3Si формируется в большей степени внутренними магнитокристаллическими силами.

Ключевые слова: магнитная анизотропия, ферромагнитные пленки, Fe_3Si , молекулярно-лучевая эпитаксия.

The magnetic anisotropy comparison of polycrystalline and single-crystal Fe_3Si films

I. A. Yakovlev

Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: yia@iph.krasn.ru

High-tech devices improvement requires development of technology and search for new materials from science. To date, the development of the magnetism research field has reached a very broad knowledge, which made it possible to create and study a variety of artificial ferromagnetic materials, which are already actively used in science and technology. The latest scientific knowledge shows that the same material in different states can exhibit different electrical and magnetic properties. So, thin magnetic films are actively used in modern devices. Physical processes in thin films proceed differently than in bulk materials. As a result, the film elements have characteristics that differ from those of bulk samples and make it possible to observe effects that are not characteristic of bulk samples. A film is a thin layer of a bound condensed substance, the thickness of which is compared with the distance of surface forces action; it is a thermodynamically stable or metastable part of a heterogeneous film-substrate system. Further study of film structures led to the creation and study of multilayer magnetic systems. In such structures, the presence of both various ferromagnetic materials layers and non-ferromagnetic interlayers is possible, and the multilayer systems properties can differ significantly from the properties of any system components. These materials also have many applications for practice, including radio communications and geological exploration. In our experiment, ferromagnetic thin films of Fe_3Si silicide were synthesized by molecular beam epitaxy with co-deposition of Fe and Si. A polycrystalline silicide film was obtained on a $SiO_2/Si(111)$ substrate, and a single crystal film was on $Si(111)7\times7$. The structure was investigated using the diffraction of reflected fast electrons directly during the growth process. The magnetic anisotropy of the obtained samples was studied by the ferromagnetic resonance. It was found that the polycrystalline film is characterized by uniaxial magnetic anisotropy, which is 13.42 Oe and is formed as a result of "oblique" deposition. And the magnetic anisotropy for a single-crystal Fe_3Si film is formed to a greater extent by internal magnetocrystalline forces.

Keywords: magnetic anisotropy, ferromagnetic films, Fe_3Si , molecular beam epitaxy.

Введение

Одним из ключевых вопросов для реализации приложений спинтроники является получение качественных эпитаксиальных ферромагнетиков с высокой спиновой поляризацией на полупроводниковых подложках. Гибридные структуры, состоящие из чередующихся металлических и полупроводниковых слоев, представляют большой интерес для современных устройств спинтроники. Важными аспектами пригодности слоистой системы материалов являются стабильный магнетизм вблизи границ раздела и подходящая плотность состояний на уровне Ферми,

которые, однако, сильно зависят от структуры интерфейса. Спиновая поляризация указывает на ее качество для использования в транспортных устройствах.

В научном сообществе интерес вызывают и системы на основе железа. Спиновая инжекция более 30 % была измерена для Fe/GaAs (001) [1], а также 10 % для Fe₃Si/GaAs(001) [2; 3]. Поскольку атомарно чистая поверхность GaAs(110) не реконструируется [4], возможен эпитаксиальный рост как для Fe, так и для квазигейслеровского Fe₃Si, для которых рассогласование решеток составляет всего 0,1 % [5].

Силицид Fe₃Si – ферромагнитный материал, который может быть многообещающим кандидатом для инжекции спин-поляризованных электронов из ферромагнетика в полупроводник [2]. Для гетероструктур Fe₃Si/GaAs исследованы структурные, транспортные и магнитные свойства [6–9]. Для эпитаксиальных пленок Fe₃Si, выращенных на GaAs (001) методом МЛЭ, магнитотранспортные свойства изучались в основном путем подачи тока вдоль трудной оси намагничивания, т. е. по кристаллографической оси [110], которая является направлением легкого скола для GaAs(100) [10].

Множество исследований показывают, что в зависимости от кристаллической структуры пленок интерфейса в слоях у одного и того же материала наблюдаются различные свойства, что определяет их будущее применение, а также разработки технологий их синтеза и обработки. Анизотропное магнитосопротивление для Fe₃Si показало, что удельное сопротивление в поле, перпендикулярном току, было больше, чем удельное сопротивление в поле, параллельном току. Известно, что в монокристаллах направление тока и намагниченности относительно осей кристалла влияет на поведение магнитосопротивления [11].

Ориентация кристаллов в тонких магнитных пленках тесно связана как с их физическими, так и с магнитными свойствами. Текстурированные магнитные материалы часто демонстрируют гораздо лучшие характеристики, такие как легкое намагничивание, большая магнитострикция и отличная прямоугольность в петле намагничивания $B-H$, график плотности магнитного потока, B , для различной напряженности магнитного поля, H [12–15]. Эта информация дает возможность создавать устройства микроэлектроники, в том числе и радиосвязи, с более высокой точностью и чувствительностью для практического использования.

В нашей работе были исследованы магнитные свойства, в том числе и магнитная анизотропия в плоскости, для пленок силицида Fe₃Si с поликристаллической и монокристаллической структурой.

Эксперимент

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии при совместном осаждении железа и кремния были получены поликристаллические и эпитаксиальные пленки Fe₃Si. Для полученных пленок изучена магнитная анизотропия методом ферромагнитного резонанса (ФМР), определены вклады однонаправленной, одноосной, кубической и гексагональной анизотропий в результирующее значение, а также высокочастотные (СВЧ) магнитные характеристики всех изучаемых пленок: ширина линии ферромагнитного резонанса, эффективная намагниченность насыщения и значения поля ферромагнитного резонанса для заданной частоты накачки.

Синтез образцов был проведен в сверхвысоковакуумной установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Анагара», базовый вакуум в которой составляет $1,3 \times 10^{-8}$ Па. Напыление осуществлялось методом термического испарения из эффузионных ячеек Кнудсена из двух источников одновременно, так называемое соосаждение, железа и кремния в атомных пропорциях Fe:Si = 3:1. Процесс формирования пленки контролировался методом дифракции отраженных быстрых электронов (ДОБЭ).

Кристаллическая структура

В ходе эксперимента была получена поликристаллическая пленка Fe_3Si толщиной 40 нм. Она была синтезирована при комнатной температуре на подложке $\text{Si}(111)$, покрытая слоем оксида SiO_2 толщиной около 1,5 нм. На рис. 1 представлена картина ДОБЭ для данной структуры.

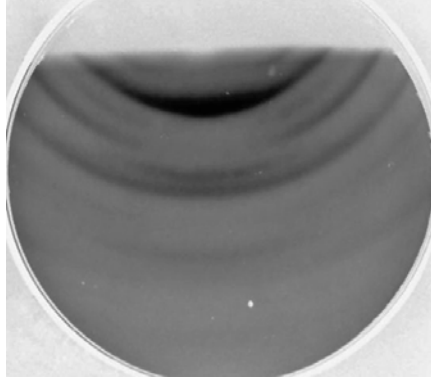


Рис. 1. Картина ДОБЭ от пленки Fe_3Si на $\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$

Fig. 1. RHEED pattern on $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$

На полученной дифрактограмме присутствуют рефлексы в виде концентрических колец Дебая, а также секторов колец. Такая геометрия дифракционной картины соответствует поликристаллической структуре с некоторой текстурой.

На рис. 2 представлена картина дифракции отраженных быстрых электронов от пленок Fe_3Si толщиной 40 нм, полученной на подложке $\text{Si}(111)7\times 7$ при комнатной температуре.

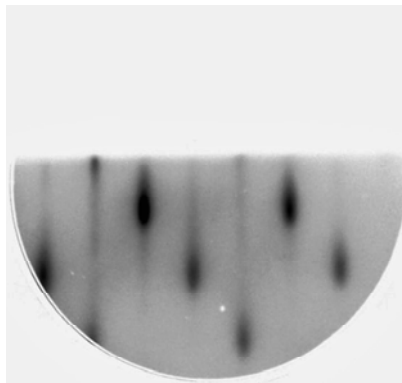


Рис. 2. Картина ДОБЭ от пленки $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)7\times 7$

Fig. 2. RHEED pattern on $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)7\times 7$

На данной дифрактограмме присутствуют рефлексы в виде точек, вытянутых в вертикальном направлении. Такая геометрия картины соответствует монокристаллической структуре пленки с островковой морфологией поверхности. Анализ дифракционных данных также показывает, что пленки Fe_3Si на $\text{Si}(111)7\times 7$ формируются эпитаксиально.

Исследование магнитной анизотропии

Для обеих пленок была исследована магнитная анизотропия методом ферромагнитного резонанса. На рис. 3 представлены угловые зависимости поля ферромагнитного резонанса,

полученные на сканирующем спектрометре ферромагнитного резонанса на частоте накачки 3,329 ГГц [16].

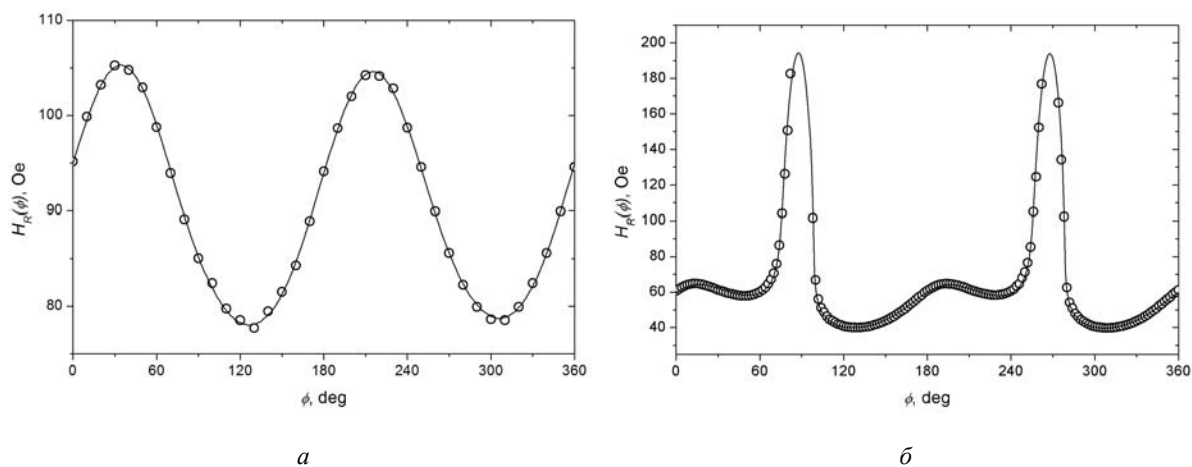


Рис. 3. Угловые зависимости поля ферромагнитного резонанса для поликристаллической пленки Fe_3Si (а); монокристаллической пленки Fe_3Si (б) (круг – экспериментальные данные, линия – расчетная кривая)

Fig. 3. The angular dependences of the ferromagnetic resonance field for polycrystalline Fe_3Si film (а); a single-crystal Fe_3Si film (б) (circle – experimental data, line – calculated curve)

По этой зависимости, исходя из феноменологической модели, по итерационной методике [17] были рассчитаны следующие характеристики для полученной пленки (табл. 1): эффективная намагниченность насыщения M_S , поле однонаправленной анизотропии H_{k1} , поле одноосной H_{k2} и поле кубической H_{k4} анизотропии. Из данных ферромагнитного резонанса также определена ширина линии ФМР в направлении оси легкого намагничивания $\Delta H_{\text{ОЛН}}$ (табл. 1).

Таблица 1

Магнитные характеристики пленок Fe_3Si

| | $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}(111)$ | $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)7 \times 7$ |
|-----------------------------|--|---|
| | поликристалл | монокристалл |
| M_S , Гс | 1235,5 | 1227,2 |
| H_{k1} , Э | 0,48 | 0,17 |
| H_{k2} , Э | 13,42 | 73,16 |
| H_{k4} , Э | 0,23 | 310,58 |
| $\Delta H_{\text{ОЛН}}$, Э | 33,5 | 7,7 |

Из анализа данных установлено, что поликристаллическая пленка характеризуется, в большей степени, только одноосной анизотропией, которая примерно в 28 раз выше других составляющих. Формирование преимущественно одноосной анизотропии вызвано, скорее всего, напылением материала под углом к поверхности подложки, так называемое «косое» напыление [18].

Для монокристаллической пленки Fe_3Si на $\text{Si}(111)7 \times 7$ были определены такие же, как и для поликристаллических образцов, магнитные характеристики (табл. 1), но по методике [19], адаптированной для монокристаллических структур.

Из полученных данных (табл. 1) видно, что у монокристаллической пленки преобладает кубическая магнитная анизотропия H_{k4} , которая более чем в 4 раза больше одноосной состав-

ляющей H_{k2} . Этот факт показывает и подтверждает то, что наша пленка имеет монокристаллическую структуру. В свою очередь, одноосная анизотропия для монокристаллического Fe_3Si более чем в 5 раз сильнее, чем для поликристаллического образца. Для установления точной природы таких различий требуются дополнительные исследования структурных и магнитных свойств всех элементов нашего образца. Но, скорее всего, это вызвано наложением нескольких факторов: разориентации поверхности подложки, «косое» напыление и внутренние силы в монокристалле.

Заключение

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии были получены поли- и монокристаллическая пленки силицида Fe_3Si на подложках Si(111). Методом ферромагнитного резонанса изучена магнитная анизотропия. Установлено, что поликристаллическая пленка характеризуется одноосной магнитной анизотропией, которая составляет 13,42 Э и формируется вследствие «косого» напыления. А магнитная анизотропия для монокристаллической пленки Fe_3Si формируется в большей степени внутренними магнитокристаллическими силами. Представленные результаты показывают, что варьируя кристаллическую структуру одного материала можно изменять его магнитные свойства и, следовательно, использовать в различных приложениях, к примеру, в устройствах спинтроники или датчиках слабых магнитных полей.

Библиографические ссылки

1. Spin injection across (110) interfaces: Fe/GaAs(110) spin-light-emitting diodes / C. H. Li, G. Kioseoglou, O. M. J. van 't Erve, A. Petrou // *Applied Physics Letters*. 2004. Vol.85, No. 9. P. 1544–1548.
2. Spin injection from Fe_3Si into GaAs / A. Kawaharazuka, M. Ramsteiner, J. Herfort, H.-P. Schonherr // *Applied Physics Letters*. 2004. Vol. 85, No. 16. P. 3492–3494.
3. Herper H. C., Entel P. Interface structure and magnetism of $Fe_3Si/GaAs(110)$ multilayers: An ab-initio study // *Philosophical Magazine*. 2008. Vol. 88, No. 18-20. P. 2699–2707.
4. Qian G.-X., Martin R., Chadi J. First-principles calculations of atomic and electronic structure of the GaAs(110) surface // *Physical review. B (Condensed matter)*. 1988. Vol. 37, No. 3. P. 1303–1307.
5. A comparative study of (Fe, Fe_3Si)/GaAs and Heusler/MgO for spintronics applications / A. Grunebohm, M. Siewert, H. C. Herper et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2010. Vol. 200. P. 072038.
6. Magnetic properties of epitaxial single crystal ultrathin Fe_3Si films on GaAs (001) / S. H. Liou, S. S. Malhotra, J. X. Shen et al. // *Journal of Applied Physics*. 1993. Vol. 73, No. 10. P. 6766–6768.
7. Transport and magnetic properties of Fe_3Si epitaxial films / H. Vinzelberg, J. Schumann, D. Elefant et al. // *Journal of Applied Physics*. 2008. Vol. 104, No. 9. P. 093707–093707.
8. Order-driven contribution to the planar Hall effect in Fe_3Si thin films / M. Bowen, K.-J. Friedland, J. Herfort et al. // *Physical Review B*. 2005. Vol. 71, No. 17. P.172401.
9. Spin and orbital magnetism in ordered $Fe_{(3\pm\delta)}Si_{(1\mp\delta)}$ binary Heusler structures: Theory versus experiment / K. Zakeri, S. J. Hashemifar, J. Lindner et al. // *Physical Review B*. 2008. Vol. 77, No. 10. P. 104430.
10. Structural, magnetic, electronic, and spin transport properties of epitaxial $Fe_3Si/GaAs(001)$ / A. Ionescu, T. Trypiniotis, H. Garcia-Miquel et al. // *Physical Review B*. 2005. Vol. 71, No. 9. P. 094401.

11. Strong crystal anisotropy of magneto-transport property in Fe₃Si epitaxial film / H. Y. Hung, S. Y. Huang, P. Chang et al. // *Journal of Crystal Growth*. 2011. Vol. 323. P. 372–375.
12. Hong J. Thickness-dependent magnetic anisotropy in ultrathin FeCoCu(001) films // *Physical Review B (Condensed matter)*. 2006. Vol. 74. P. 172408
13. Arai K. I., Ohoka Y., Wakui Y. Preparation and magnetic properties of anodic oxide magnetic films // *Electronics and Communications in Japan. (Part II Electronics)*. 1989. Vol. 72, No. 5. P. 81–88.
14. Liu X., Shiozaki Y., Morisako A. Magnetization reversal mechanism of ultra thin Nd₂Fe₁₄B films with perpendicular magnetic anisotropy // *Journal of Applied Physics*. 2008. Vol. 103. P. 07E104.
15. Texture and magnetic properties of Fe thin films fabricated by field-sputtering vs field-annealing / S. J. Park, C.-H. Liu, H. S. Kim et al. // *Thin Solid Films*. 2015. Vol. 594. P. 178–183.
16. Диагностика тонкопленочных структур методом ферромагнитного резонанса : учеб. пособие / Беляев Б. А., Волошин А. С., Изотов А. В. и др. Красноярск, Сибирский федер. ун-т, 2011. 104 с.
17. Belyaev B. A., Izotov A. V., Leksikov A. A. Magnetic imaging in thin magnetic films by local spectrometer of ferromagnetic resonance // *IEEE Sensors Journal*. 2005. Vol. 5, No. 2. P. 260–267.
18. Uniaxial magnetic anisotropy in Pd/Fe bilayers on Al₂O₃ (0001) induced by oblique deposition / C.-S. Chi, B.-Y. Wang, W.-F. Pong et al. // *Journal of Applied Physics*. 2012, Vol. 111. P. 123918.
19. Belyaev B. A., Izotov A. V. FMR Study of the anisotropic properties of an epitaxial Fe₃Si film on a Si(111) Vicinal Surface // *JETP Letters*. 2016. Vol. 103, No. 1. P 41–45.

References

1. Li C. H., Kioseoglou G., J. van 't Erve O. M., Petrou A. Spin injection across (110) interfaces: Fe/GaAs(110) spin-light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*. 2004, Vol. 85, No. 9, P. 1544–1548.
2. Kawaharazuka A., Ramsteiner M., Herfort J., Schonherr H.-P. Spin injection from Fe₃Si into GaAs. *Applied Physics Letters*. 2004, Vol. 85, No. 16, P. 3492–3494.
3. Herper H. C., Entel P. Interface structure and magnetism of Fe₃Si/GaAs(110) multilayers: An ab-initio study. *Philosophical Magazine*. 2008, Vol. 88, No. 18-20, P. 2699–2707.
4. Qian G.-X., Martin R., Chadi J. First-principles calculations of atomic and electronic structure of the GaAs(110) surface. *Physical review. B (Condensed matter)*. 1988, Vol. 37, No. 3, P. 1303–1307.
5. Grunebohm A., Siewert M., Herper H. C., Gruner M. E., Entel P. A comparative study of (Fe, Fe₃Si)/GaAs and Heusler/MgO for spintronics applications. *Journal of Physics: Conference Series*. 2010, Vol. 200, P. 072038.
6. Liou S. H., Malhotra S. S., Shen J. X., Hong M., Kwo J., Chen H.-C., Mannaerts J. P. Magnetic properties of epitaxial single crystal ultrathin Fe₃Si films on GaAs (001). *Journal of Applied Physics*. 1993, Vol. 73, No. 10, P. 6766–6768.
7. Vinzelberg H., Schumann J., Elefant D., Arushanov E., Schmidt O. G. Transport and magnetic properties of Fe₃Si epitaxial films. *Journal of Applied Physics*. 2008, Vol. 104, No. 9, P. 093707–093707.
8. Bowen M., Friedland K.-J., Herfort J., Schönherr H.-P., Ploog K. H. Order-driven contribution to the planar Hall effect in Fe₃Si thin films. *Physical Review B*. 2005, Vol. 71, No. 17, P.172401.
9. Zakeri K., Hashemifar S. J., Lindner J., Barsukov I., Meckenstock R., Kratzer P., Frait Z., Farle M. Spin and orbital magnetism in ordered Fe_(3±δ)Si_(1∓δ) binary Heusler structures: Theory versus experiment. *Physical Review B*. 2008, Vol. 77, No. 10, P. 104430.

10. Ionescu A., Trypiniotis T., Garcia-Miquel H., Vickers M. E., Dalgliesh R. M., Langridge S., Bugoslavsky Y., Miyoshi Y., Cohen L. F. Structural, magnetic, electronic, and spin transport properties of epitaxial Fe₃Si/GaAs(001). *Physical Review B*. 2005, Vol. 71, No. 9, P. 094401.
11. Hung H. Y., Huang S. Y., Chang P., Lin W. C., Liu Y. C., Lee S. F., Hong M., Kwo J. Strong crystal anisotropy of magneto-transport property in Fe₃Si epitaxial film. *Journal of Crystal Growth*. 2011, Vol. 323, P. 372–375.
12. Hong J. Thickness-dependent magnetic anisotropy in ultrathin FeCo/Cu(001) films. *Physical Review B.(Condensed matter)*. 2006, Vol. 74, P. 172408
13. Arai K. I., Ohoka Y., Wakui Y. [Preparation and magnetic properties of anodic oxide magnetic films]. *Electronics and Communications in Japan. (Part II Electronics)*. 1989, Vol. 72, No. 5, P. 81–88.
14. Liu X., Shiozaki Y., Morisako A. Magnetization reversal mechanism of ultra thin Nd₂Fe₁₄B films with perpendicular magnetic anisotropy. *Journal of Applied Physics*. 2008, Vol. 103, P. 07E104.
15. Park S. J., Liu C.-H., Kim H. S., Park N. J., Jin S., Han J. H. Texture and magnetic properties of Fe thin films fabricated by field-sputtering vs field-annealing. *Thin Solid Films*. 2015, Vol. 594, P. 178–183.
16. Belyaev B. A., Voloshin A. S., Izotov A. V. et al. *Diagnostika tonkoplenochnykh struktur metodom ferromagnitnogo rezonansa : uchebnoe posobie* [Thin-film structures investigation by the ferromagnetic resonance: a tutorial]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2011, 104 p.
17. Belyaev B. A., Izotov A. V., Leksikov A. A. Magnetic imaging in thin magnetic films by local spectrometer of ferromagnetic resonance. *IEEE Sensors Journal*. 2005, Vol. 5, No. 2, P. 260–267.
18. Chi C.-S., Wang B.-Y., Pong W.-F., Ho T.-Y., Tsai C.-J., Lo F.-Y., Chern M.-Y., Lin W.-C. Uniaxial magnetic anisotropy in Pd/Fe bilayers on Al₂O₃ (0001) induced by oblique deposition. *Journal of Applied Physics*. 2012, Vol. 111, P. 123918.
19. Belyaev B. A., Izotov A. V. FMR Study of the anisotropic properties of an epitaxial Fe₃Si film on a Si(111) Vicinal Surface. *JETP Letters*. 2016, Vol. 103, No. 1, P. 41–45.

© Яковлев И. А., 2021

Яковлев Иван Александрович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КИЦ СО РАН. E-mail: yia@iph.krasn.ru.

Yakovlev Ivan Aleksandrovich – candidate of physical and mathematical sciences, researcher, Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS. E-mail: yia@iph.krasn.ru.
