

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.216.2:537.624

СВЕРХБЫСТРОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ ЕДИНИЧНЫМ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ИМПУЛЬСОМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛЕНКАХ DyFeCo

© 2019 г. С. В. Овчаренко^{а, *}, П. О. Якушенков^а, Н. А. Ильин^а, К. А. Брехов^а,
Е. М. Семенова^б, Анхуа Ву^с, Е. Д. Мишина^а

^аРоссийский технологический университет (РТУ МИРЭА),
проспект Вернадского, 78, Москва, 19454 Россия

^бТверской государственный университет, ул. Желябова, 33, Тверь, 170100 Россия

^сШанхайский институт керамики Китайской академии наук,
1295 Dingxi road, Shanghai, 200050 КНР

*e-mail: serg30101993@gmail.com

Поступила в редакцию 06.08.2018 г.

После доработки 26.03.2019 г.

Принята к публикации 10.04.2019 г.

Экспериментально продемонстрирована возможность локального полностью оптического переключения направления намагниченности тонкой ферромагнитной пленки сплава редкоземельного и переходного металлов DyFeCo фемтосекундным линейно- и циркулярно-поляризованным лазерными импульсами длительностью 35 фс. Используются режимы экспонирования одиночным импульсом и последовательностью из нескольких импульсов без приложения внешнего магнитного поля. Выявленные особенности переключения в DyFeCo существенно отличаются от результатов, полученных до этого в сплавах редкая земля — переходный металл. Минимальная номинальная плотность энергии для переворота направления намагниченности составила 3 мДж/см².

Ключевые слова: полностью оптическое переключение, фемтосекундный импульс, антиферромагнетики

DOI: 10.1134/S0015323019090110

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное увеличение объема хранимой и обрабатываемой информации рождает потребность в улучшении таких характеристик современных запоминающих устройств как скорость записи и считывания, а также плотность хранения информации. В настоящее время порядок времени записи одного бита информации для передовых технологий магнитной памяти (VCMA-MRAM) составляет сотни пикосекунд [1]. Более того, в 2004 г. было показано, что даже применение ультракоротких сильных импульсов магнитного поля длительностью менее 2 пс, полученных на линейном ускорителе в Стенфорде, не способно обеспечить переключение магнитного параметра порядка в среде в устойчивое состояние [2]. Наличие фундаментального предела и технологические сложности в его достижении стимулируют поиск более быстрых и энергоэффективных подходов к магнитной записи информации. Одним из таких подходов является применение лазерных импульсов фемтосекундной длительности для управления направлением намагниченности в среде.

В последние годы активно ведутся исследования возможности применения коротких оптических и ТГц импульсов для переключения параметра порядка в магнитных и сегнетоэлектрических материалах [3]. С практической точки зрения воздействие фемтосекундного лазерного излучения на магнитоупорядоченные среды [4, 5] представляет возможность реализовать магнитное запоминающее устройство, в котором длительность процесса записи информации может составлять сотни фемтосекунд [6]. Спрос на устройства с такими характеристиками стимулирует исследования в области сверхбыстрого магнетизма, что является неотъемлемой частью развития фундаментальных принципов управления спиновой динамикой с минимальными затратами энергии.

В настоящее время оптическое управление намагниченностью без приложения внешнего магнитного поля было продемонстрировано в различных материалах: в тонких пленках сплавов редкоземельных и переходных металлов [4], диэлектриках,

в том числе в ортоферритах [7] и гранатах [8], полупроводниках [9] и гетероструктурах [10].

Тонкие пленки сплавов редкоземельных и переходных металлов широко применяются при производстве магнитооптических дисков, а также используются в технологиях магнитной памяти [11]. В данной группе материалов возможность воздействия на магнитное состояние среды фемтосекундным лазерным импульсом впервые была продемонстрирована в работе [12], а 180° переворот направления намагниченности в тонкой пленке GdFeCo фемтосекундным лазерным импульсом был продемонстрирован в работе [4].

Предполагаемый механизм переключения состояния намагниченности для сплавов редкоземельных и переходных металлов был изучен и теоретически описан в более поздних исследованиях [13, 14]. Он основан не на эффектах Фарадея и Коттона–Мутона [7], как предполагали ранее [6], а на размагничивании, вызванном нагревом фемтосекундным лазерным импульсом, с сохранением суммарного углового момента. Возрастание тепловой энергии системы за счет передачи энергии фемтосекундного лазерного импульса электронам в металле на субпикосекундном временном масштабе приводит к образованию локальной области со спиновой температурой, значительно превышающей температуру Кюри T_C . За счет электрон-фононного взаимодействия температура электронов быстро уменьшается, приближаясь к температуре Кюри менее, чем за 1 пс. Происходит релаксация обменного взаимодействия спинов, в процессе которого суммарное направление магнитного момента подрешеток сплава изменяется [15]. Различие величин магнитных моментов каждой из подрешеток в совокупности с процессом обменного взаимодействия приводит к тому, что одна из них размагничивается раньше, и образуется состояние с параллельным направлением магнитного момента каждой из подрешеток. При продолжении релаксации обменного взаимодействия величина магнитного момента одной из подрешеток увеличивается, а другой уменьшается. Если энергия антиферромагнитного обменного взаимодействия значительно меньше энергии ферромагнитного порядка размагниченной подрешетки, то направление намагниченности другой подрешетки изменяется за счет обменного взаимодействия. В результате, релаксация обменного взаимодействия от неравновесного состояния до частично равновесного приводит к переключению суммарного направления намагниченности металлической пленки в области воздействия [13].

Обобщая сказанное выше, можно сделать вывод, что для наблюдения полностью оптического переключения магнитного состояния в тонких пленках сплавов редкоземельных и переходных

металлов необходимо наличие подрешеток с различной величиной суммарного магнитного момента, и, как следствие, различной длительности процесса их размагничивания [16]. Данный процесс, в свою очередь, должен приводить к детерминированному перевороту намагниченности в противоположные стороны несколькими импульсами за исключением узкого “окна” плотностей энергии.

ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦА

Предмет наших исследований – ферримагнитный аморфный сплав редкоземельных и переходных металлов $Dy_{0.22}Fe_{0.68}Co_{0.1}$, отвечает требованиям, описанным выше. Пленка получена методом магнетронного напыления, в качестве подложки использовано стекло. На подложку нанесены последовательно 10 нм AlTi, 5 нм SiN, 20 нм DyFeCo и 5 нм SiN. В качестве защитного слоя использован SiN, а для лучшего теплоотвода – слой AlN.

Выбор данного материала обусловлен его широким применением в технологиях магнитооптической записи [11]. Магнитооптические свойства тонких пленок исследуемого сплава являются предметом исследований довольно давно и хорошо изучены. Температура компенсации для данного материала составляет около 330 К, а температура Кюри около 450 К [17].

Для данного материала характерна значительная перпендикулярная магнитная анизотропия, необходимая для применения в устройствах магнитной памяти. Следовательно, изучение возможности осуществления оптического переключения в данном материале без приложения внешнего магнитного поля представляет не только научный, но и практический интерес.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе исследована возможность локального переворота направления намагниченности единичным фемтосекундным импульсом, а также последовательностью из 2, 3, 4, 10, 11, 19 и 20 импульсов в зависимости от поляризации и плотности энергии, создаваемой на образце.

Режим последовательности из двух импульсов выбран с целью определить, является ли механизм переключения в исследуемом материале схожим с представленным для GdFeCo [4]. Учитывая частоту повторения импульсов и время переключения намагниченности для большинства исследованных материалов [18], воздействие двумя импульсами в последовательности можно рассматривать как воздействие двух независимых импульсов в одинаковых условиях.

Фемтосекундные лазерные импульсы получены с помощью титан-сапфировой лазерной системы (Katyusha, ООО “АВЕСТА-ПРОЕКТ”) с регенеративным усилителем (ООО “АВЕСТА-ПРОЕКТ”), генерирующей импульсное излучение длительностью 35 фс со средней мощностью 600 мВт на длине волны 800 нм. Излучение лазера фокусировали на образец в пятно диаметром 5 мкм при комнатной температуре. В схеме эксперимента для получения линейно поляризованного излучения использована коммерческая призма Глана–Тейлора (Thorlabs, GT10, 1/100000). Для получения циркулярно- поляризованного излучения использована четвертьволновая пластинка (Thorlabs, ANHP05M-600). Данные оптические элементы установлены в схеме эксперимента непосредственно перед фокусирующим объективом, это позволяет сделать вывод, что степень эллиптичности в эксперименте мала и не играет существенной роли.

Пленка DyFeCo была предварительно намагничена нормально к поверхности. Экспонирование осуществляли единичным импульсом, либо последовательностью импульсов с частотой повторения 3 кГц. После каждого этапа воздействия образец перемещали в плоскости, ортогональной оптической оси, и экспонирование повторяли. Номинальная плотность энергии на образце варьировалась от 15 до 3 мДж/см², точность составляет 0.3 мДж/см².

Изменение перпендикулярной составляющей суммарного направления намагниченности в образце после экспонирования было исследовано на поляризационном микроскопе в геометрии полярного эффекта Керра. На полученных изображениях домены, намагниченные “вверх”, отображаются как светлые области, а намагниченные “вниз”, как темные области. Для улучшения контраста и компенсации фонового сигнала в качестве результирующего изображения представлена разность изображений, полученных при двух положениях анализатора, обеспечивающих “светлое” и “темное” изображение доменной структуры.

В качестве оценочной меры степени зависимости переключения от изменяемых параметров использованы размеры переключенных областей для одного импульса и всех использованных последовательностей. Под размером понимается ширина на полувысоте в горизонтальном сечении изображения, полученном на поляризационном микроскопе, усредненная по нескольким строкам пикселей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования зависимости процесса переключения намагниченности от плотности энергии на образце, а также от поляризации

при воздействии единичным, а также последовательностью из 2, 19 и 20 импульсов, представлены на рис. 1. Было получено локальное изменение направления намагниченности в пленке, но, как видно из рис. 1а, последовательность из двух импульсов не приводит к возвращению направления намагниченности к исходному, следовательно, процесс перемагничивания в данном составе отличается от GdFeCo [4].

Выбор последовательностей из 19 и 20 импульсов обусловлен оценкой влияния многоимпульсного режима на характер перемагничивания. Как видно из зависимостей на рис. 1б, размер переключенной области зависит от количества импульсов и увеличивается с увеличением количества импульсов для номинальных плотностей энергии 15 и 6 мДж/см², что можно интерпретировать как своего рода “кумулятивный эффект”. Отсутствие переключенных областей для последовательности из 19 и 20 импульсов при плотности энергии 6 мДж/см² обусловлены механическим дефектом пленки. При этом сравнение размера переключенных областей при различных плотностях энергии не является корректным ввиду изменения плотности энергии вследствие расфокусировки при экспонировании различных областей пленки.

При данных плотностях энергии не наблюдается зависимость переключения от поляризации, откуда можно сделать вывод, что процесс перемагничивания имеет тепловую природу.

Важной особенностью является отсутствие поворота направления намагниченности для левоциркулярного излучения при номинальной плотности энергии 3 мДж/см². Возникновение данной области, как видится, является следствием магнитного кругового дихроизма [19]. При этом размер переключенной области для данной плотности энергии не зависит существенно от количества импульсов в последовательности.

Увеличенные изображения областей, переключенных при минимальной используемой плотности энергии (3 мДж/см²) одним импульсом, а также последовательностью из 2, 3, 4, 10, 11, 19 и 20 право- и линейно поляризованных лазерных импульсов, представлены на рис. 2.

Область, экспонированная левоциркулярными импульсами, не отображена на рис. 2 из-за отсутствия изменений начального магнитного состояния среды. При этом количество импульсов в последовательности при данной плотности энергии не влияло на результат. При меньшей плотности энергии изменений в среде не наблюдали.

Стоит отметить, что переключенные области можно было вернуть в исходное состояние при приложении внешнего импульсного магнитного поля величиной 100 кЭ с длительностью импульса 15 мс нормально к поверхности пленки. Это го-

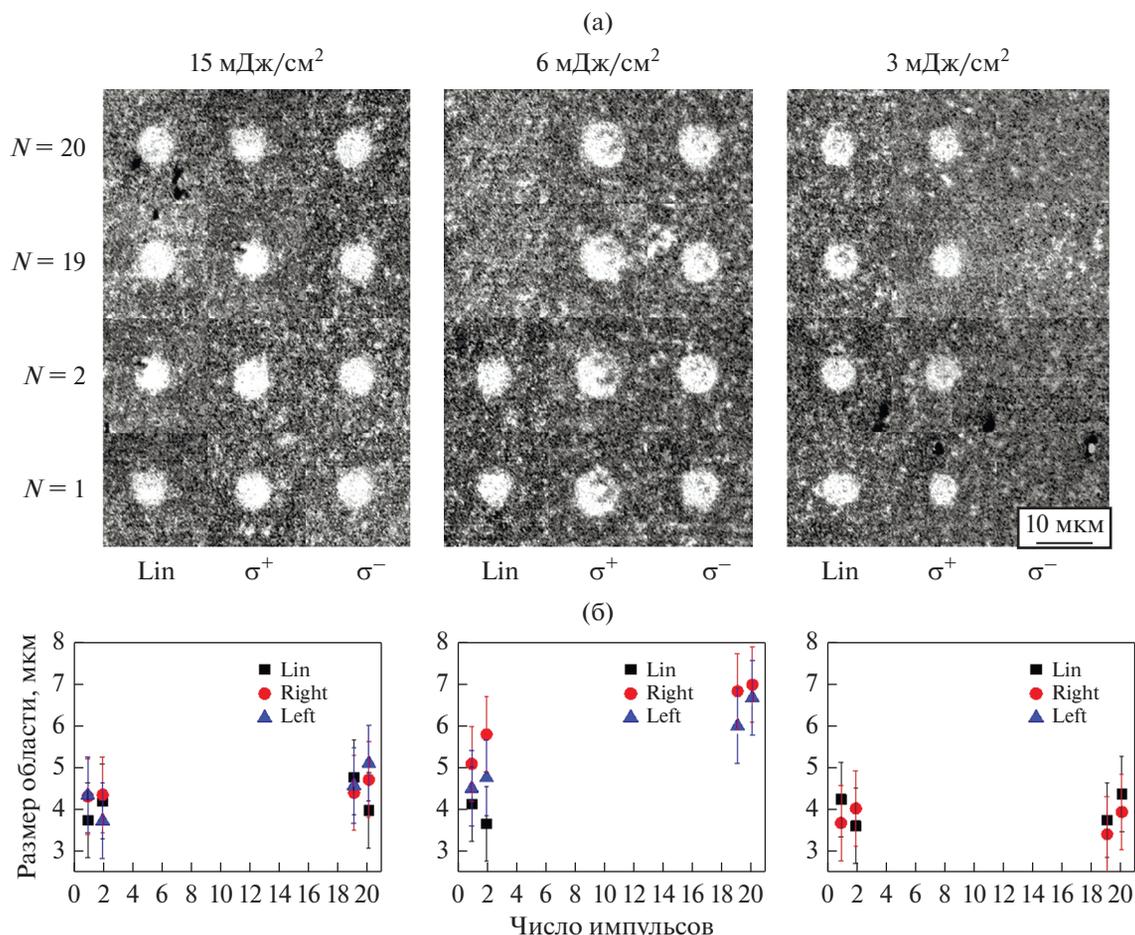


Рис. 1. (а) Изображения областей пленки DyFeCo после экспонирования при номинальной плотности энергии 15, 6, 3 мДж/см², полученные с помощью поляризационного микроскопа. σ⁺, σ⁻, Lin – результат воздействия импульсов с “правой”, “левой” и линейной поляризацией соответственно, N – количество импульсов. (б) Зависимости размера переключенной области от числа импульсов в последовательности. Значения приведенных размеров усреднены по 6 областям, экспонированным в одинаковых условиях.

ворит о том, что переключение в принципе является обратимым, хотя и не удалось продемонстрировать переключение обратно вторым лазерным импульсом.

Важно, что процесс полностью оптического переключения не наблюдается в чистых пленках магнитных элементов, а только в сплавах и гетероструктурах $3d$ - и $4f$ -элементов (например, Fe и Gd); $3d$ - и $4d$ -элементов (например, Co и Pd); или $3d$ - и $5d$ -элементов (Fe или Co и Pt или Ir). Сверхбыстрые процессы, вызванные воздействием сверхбыстрых лазерных импульсов, обусловлены двумя основными взаимодействиями: спин-орбитальными и обменными. Можно предположить, что межфазные и межподрешеточные обменные взаимодействия и межфазные спин-орбитальные взаимодействия играют решающую роль в эффектах полностью оптического переключения [20].

В отличие от Gd, у Tb, Dy и Ho значительные орбитальные моменты, что приводит к увеличению спин-орбитального взаимодействия и магнитной анизотропии. Но сплавы, в состав которых входят данные металлы, качественно показывают схожие картины переключения [10].

Сплав TbFeCo, как и DyFeCo, обладает большим спин-орбитальным взаимодействием. Но для данного сплава, в отличие от исследуемого, наблюдается полностью оптическое переключение, определяемое поляризацией лазерного излучения [21].

При этом в сплаве DyCo, обладающем меньшими орбитальными и спиновыми магнитными моментами [22], чем DyFeCo при схожих концентрациях редкоземельного металла, наблюдается полностью оптическое переключение с зависимостью от поляризации, но только в узком окне концентраций редкоземельного элемента [10].

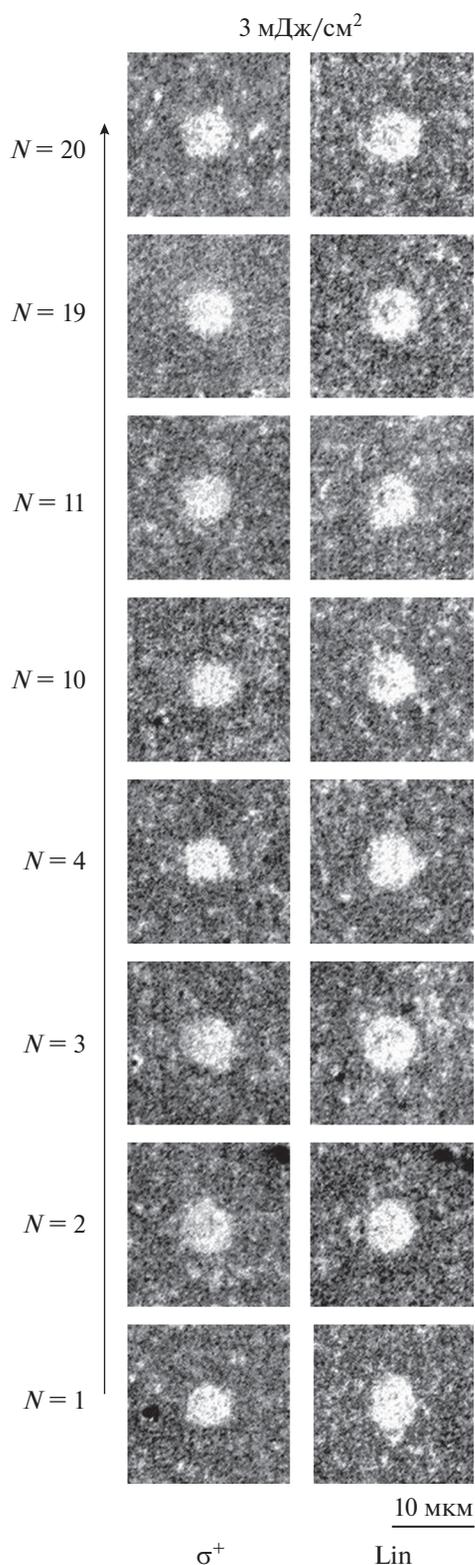


Рис. 2. Изображения областей пленки DyFeCo после экспонирования при номинальной плотности энергии 3 мДж/см², полученные с помощью поляризационного микроскопа, σ^+ , Lin – результат воздействия импульсов с “правой” и линейной поляризацией, соответственно. N – количество импульсов.

Исходя из этого, основным механизмом в данном случае видится переход через точку компенсации, которая для составов, в которых наблюдался эффект, превышает комнатную температуру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность локального переворота направления намагниченности в тонкой пленке аморфного сплава редкоземельных и переходных металлов Dy_{0.22}Fe_{0.68}Co_{0.1} с помощью единичного фемтосекундного лазерного импульса, а также последовательности из нескольких импульсов. Минимальная плотность энергии, при которой наблюдали изменение магнитного порядка в среде, 3 ± 0.3 мДж/см².

Для плотностей энергии, при которых слабо проявляется влияние магнитного кругового дихроизма на результат экспонирования, увеличение числа импульсов в последовательности приводит к “кумулятивному эффекту”, а именно к увеличению размера переключенной области. Можно предположить, что основным механизмом переключения является переход через точку компенсации намагниченности двух взаимодействующих подрешеток.

Анализ влияния параметров лазерного излучения при полностью оптическом переключении направления намагниченности позволяет исследовать технологические возможности использования пленок редкоземельных и переходных металлов для магнитной памяти и приблизить появления устройств, основанных на вышеописанных физических принципах.

Вопрос о длительности переворота локального направления намагниченности остается открытым и будет являться предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 18-52-53030), а также при поддержке Министерства образования и науки РФ (госзадание № 3.7500.2017/9.10 (К.А. Брехов), 3.1923.2017/4.6 (С.В. Овчаренко) и 16.4699.2017/6.7 (Е.Д. Мишина в части организации исследований)). Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП “УНО “Электроника”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang Kang, Liang Chang, Youguang Zhang, Weisheng Zhao Voltage-controlled MRAM for working memory: Perspectives and challenges // Design, Automation and Test in Europe (DATE). 2017. P. 524–547.
2. Tudosa I., Stamm C., Kashuba A.B., King F., Siegmann H.C., Stöhr J., Ju G., Lu B., Weller D. The ultimate speed of magnetic switching in granular recording media // Nature. 2004. V. 428. P. 831–833.

3. Мишина Е.Д., Гришунин К.А. Динамическое переключение поляризации сегнетоэлектрика коротким терагерцовым импульсом // РТЖ. 2017. Т. 5. № 3. С. 41–50.
4. Stanciu C.D., Hansteen F., Kimel A.V., Kirilyuk A., Tsukamoto A., Itoh A., Rasing Th. All-Optical Magnetic Recording with Circularly Polarized Light // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. № 4. P. 047601.
5. De Jong J.A., Razdolski I., Kalashnikova A.M., Pisarev R.V., Balbashov A.M., Kirilyuk A., Kimel A.V. Coherent control of the route of an ultrafast magnetic phase transition via low-amplitude spin precession // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. № 15. P. 157601.
6. Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing Th. Ultrafast optical manipulation of magnetic order // Rev. Mod. Phys. 2010. V. 82. № 3. P. 2731–2783.
7. Kimel A.V., Kirilyuk A., Hansteen F., Pisarev R.V., Rasing Th. Nonthermal optical control of magnetism and ultrafast laser-induced spin dynamics in solids // J. Phys.: Cond. Mat. 2007. V. 19. № 4. P. 043201.
8. Stupakiewicz A., Szerenos K., Davydova M.D., Zvezdin K.A., Zvezdin A.K., Kirilyuk A., Kimel A.V. Selection Rules for All-Optical Magnetic Recording in Iron Garnet // arXiv preprint 2018 arXiv:1805.02021.
9. Wang J., Sun C., Hashimoto Y., Kono J., Khodaparast G.A., Cywinski Ł., Sham L.J., Sanders G.D., Stanton C.J., Munekata H. Ultrafast magneto-optics in ferromagnetic III–V semiconductors // J. Phys.: Cond. Mat. 2006. V. 18. P. R501–R530.
10. Mangin S., Gottwald M., Lambert C.-H., Steil D., Uhlř V., Pang L., Hehn M., Alebrand S., Cinchetti M., Malinowski G., Fainman Y., Aeschlimann M., Fullerton E.E. Engineered materials for all-optical helicity-dependent magnetic switching // Nat. Mater. 2014. V. 13. P. 286–292.
11. Saito N., Yamada M., Nakagawa S. Improvement of stress-induced magnetization reversal process of DyFeCo thin films // J. App. Phys. 2008. V. 103. № 7. P. 07A706.
12. Beaurepaire E., Merle J.-C., Daunois A., Bigot J.-Y. Ultrafast Spin Dynamics in Ferromagnetic Nickel // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. № 22. P. 4250–4253.
13. Ostler T.A., Barker J., Evans R.F.L., Chantrell R.W., Atxitia U., Chubykalo-Fesenko O., El moussaoui S., Le Guyader L., Mengotti E., Heyderman L.J., Nolting F., Tsukamoto A., Itoh A., Afanasiev D., Ivanov B.A., Kalashnikova A.M., Vahaplar K., Mentink J., Kirilyuk A., Rasing Th., Kimel A.V. Ultrafast heating as a sufficient stimulus for magnetization reversal in a ferrimagnet // Nat. Commun. 2012. V. 3. P. 666.
14. Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing Th. Laser-induced magnetization dynamics and reversal in ferrimagnetic alloys // Rep. Prog. Phys. 2013. V. 76. № 2. P. 026501.
15. Bar'yakhtar V.G. Phenomenological description of relaxation processes in magnetic materials // Sov. Phys. JETP. 1984. V. 60. P. 863–867.
16. Radu, Vahaplar K., Stamm C., Kachel T., Pontius N., Duřr H.A., Ostler T.A., Barker J., Evans R.F.L., Chantrell R.W., Tsukamoto A., Itoh A., Kirilyuk A., Rasing Th., Kimel A.V. Transient ferromagnetic-like state mediating ultrafast reversal of antiferromagnetically coupled spins // Nature. 2011. V. 472. P. 205–208.
17. Carey R., Newman D.M., Snelling J.P., Thomas B.W.J., Dieu L. The magnetic properties of DyFeCo thin films // J. Magn. Magn. Mat. 1995. V. 148. P. 491–496.
18. Vahaplar K., Kalashnikova A.M., Kimel A.V., Gerlach S., Hinzke D., Nowak U., Chantrell R., Tsukamoto A., Itoh A., Kirilyuk A., Rasing Th. All-optical magnetization reversal by circularly polarized laser pulses: Experiment and multiscale modeling // Phys. Rev. B. 2012. V. 85. № 10. P. 104402.
19. Khorsand A.R., Savoini M., Kirilyuk A., Kimel A.V., Tsukamoto A., Itoh A., Rasing Th. Role of Magnetic Circular Dichroism in All-Optical Magnetic Recording // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. № 12. P. 127205.
20. Hellman F., Hoffmann A., Tserkovnyak Y., Beach G.S., Fullerton E.E., Leighton C., Fischer P. Interface-induced phenomena in magnetism // Reviews of modern physics. 2017. V. 89. № 2. P. 025006.
21. Xianyang Lu, Xiao Zou, Denise Hinzke, Tao Liu, Yichuan Wang, Tuyuan Cheng, Jing Wu, Thomas A. Ostler, Jianwang Cai, Ulrich Nowak, Roy W. Chantrell, Ya Zhai, Yongbing Xu. Roles of heating and helicity in ultrafast all-optical magnetization switching in TbFeCo // Applied Physics Letters. 2018. V. 113. № 3. P. 032405.
22. Fleury-Frenette K., Dhesi S.S., van der Laan G., Strivay D., Weber G., Delwiche J. Characteristics of the iron moment in Dy–Fe and Dy–FeCo amorphous alloys studied by X-ray magnetic circular dichroism // J. Magn. Magn. Mat. 2000. V. 220. № 1. P. 45–51.