

**Динамика намагниченности в многослойных структурах
TbCo/FeCo под действием фемтосекундного
оптического возбуждения**

Н.А. Ильин¹,
А.А. Климов¹,
N. Tiercelin²,
P. Pernod²,
Е.Д. Мишина^{1,@},
М.С. Гапонов¹,
К.А. Брехов¹,
А.С. Сигов¹,
В.Л. Преображенский³

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²University Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 - IEMN, F-59000 Lille, France

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва 119991, Россия

@Автор для переписки, e-mail: mishina_elena57@mail.ru

Необходимость исследования сверхбыстрых процессов в магнетизме обусловлена перспективами создания сверхбыстрой магнитной записи и сверхбыстрых спинtronных устройств. Для возбуждения магнитной подсистемы, выражающегося в спиновой прецессии, используются фемтосекундные оптические импульсы. В металлах, вследствие значительного оптического поглощения, в первую очередь происходит нагрев материала и значительные джоулевы потери. Важнейшей задачей является поиск материалов, в которых спиновые процессы возбуждаются без нагрева. Очевидными кандидатами являются слабо поглощающие материалы, например, феррит-гранаты. Однако набор таких материалов и спектр их функциональных возможностей ограничен. Целью данной работы является выявление особенностей динамики систем с нетепловыми механизмами возбуждения спиновой прецессии. Такое возбуждение возможно в гетероструктурах ферромагнетик/аниферромагнетик с обменным взаимодействием при условии, что время рекомбинации фотоносителей меньше, чем время диффузии тепла. Исследованы на фемтосекундный оптический импульс ближнего ИК-диапазона многослойные структуры TbCo/FeCo. Проведено сравнение спиновой динамики при направлении волнового вектора возбуждающего импульса вдоль и перпендикулярно оси легкого намагничивания структур (геометрии «легкая ось» и «трудная ось», соответственно). Показано, что в геометрии «легкая ось» определяющим является тепловой механизм взаимодействия, который при воздействии возбуждающего импульса приводит к уменьшению проекции намагниченности на направление распространения пробного луча. В геометрии «трудная ось» на начальном этапе намагниченность разворачивается к магнитному полю, а затем,



прецессирия, релаксирует к равновесной угловой ориентации. Такая динамика указывает на быстрое восстановление величины поля одноосной анизотропии после лазерного воздействия. Представленные результаты демонстрируют сверхбыстрое изменение магнитной анизотропии, наведенной в процессе изготовления исследуемой гетероструктуры, что может представлять интерес для оптического управления ориентацией намагниченности.

Ключевые слова: магнитные гетероструктуры, оптическое управление намагниченностью, сверхбыстрое размагничивание, сверхбыстрое изменение магнитной анизотропии, фемтосекундное лазерное излучение.

Dynamics of Magnetization in Multilayer TbCo / FeCo Structures under the Influence of Femtosecond Optical Excitation

Nikita A. Ilyin¹,
Alexey A. Klimov¹,
Nicolas Tiercelin²,
Philippe Pernod²,
Elena D. Mishina^{1,@},
Mikhail S. Gaponov¹,
Kirill A. Brekhov¹,
Alexander S. Sigov¹,
Vladimir L. Preobrazhensky³

¹*MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia*

²*University Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 - IEMN, F-59000 Lille, France*

³*Prokhorov General Physics Institute, Moscow 119991, Russia*

@Corresponding author e-mail: mishina_elena57@mail.ru

The need to study ultrafast processes in magnetism is due to the prospects for creating ultrafast magnetic recording and ultrafast spintronic devices. In order to excite the magnetic subsystem femtosecond optical pulses are used. The excitement is manifested as in spin precession. In metals, the material is heated first due to significant optical absorption, and significant Joule losses occur. The most important task is to search for materials in which spin processes are excited without heating. Obvious candidates are weakly absorbing materials, such as ferrite garnets. However, the range of such materials and the range of their functionality are limited. The purpose of this work is to study the dynamics of systems with nonthermal mechanisms of spin precession excitation. Such excitation is possible in ferromagnetic / antiferromagnetic heterostructures with exchange interaction, provided that the recombination time of photocarriers is shorter than the time of heat diffusion. Multilayer TbCo / FeCo structures of the near IR range were investigated for a femtosecond optical pulse. The spin dynamics are compared with the direction of the wave vector of the exciting pulse along and perpendicular to the axis of easy magnetization of the structures (“easy axis” and “hard axis” geometry, respectively). It is shown that in case of “easy axis” geometry the determinative mechanism is the thermal interaction. When the system is exposed to an excitation pulse, this mechanism leads to a decrease in the projection of magnetization on the

direction of propagation of the test beam. In case of “hard axis” geometry, the magnetization turns to the magnetic field at the initial stage. Then it precesses and relaxes to an equilibrium angular orientation. Such dynamics indicate a rapid recovery of the uniaxial anisotropy field after laser irradiation. The presented results demonstrate an ultrafast change in the magnetic anisotropy induced during the fabrication of the heterostructure under study, which may be of interest for optical control of the orientation of the magnetization.

Keywords: magnetic heterostructures, optical control of magnetization, ultrafast demagnetization, ultrafast change in magnetic anisotropy, femtosecond laser light.

Интерес к исследованию сверхбыстрых процессов в магнетизме связан, прежде всего, с перспективами создания сверхбыстрой магнитной записи и сверхбыстрых спинtronных устройств [1–3]. Оптимизация разрабатываемых материалов и устройств требует глубокого понимания процессов, происходящих на временной шкале от десятков фемтосекунд до десятков пикосекунд и затрагивающих электронную, спиновую и решеточную подсистемы. Для возбуждения магнитной подсистемы, выражающегося в спиновой прецессии, используются фемтосекундные оптические импульсы. Поведение магнитной подсистемы регистрируется с помощью эффекта Керра в схеме оптического возбуждения-зондирования [1].

В металлах, вследствие значительного оптического поглощения, в первую очередь происходит нагрев материала, обусловливающий значительные джоулевы потери. Важнейшей задачей является поиск материалов, в которых спиновые процессы возбуждаются без нагрева. Очевидными кандидатами являются слабо поглощающие материалы, например, феррит-гранаты [4]. Однако набор таких материалов и спектр их функциональных возможностей ограничен. Другой подход, применимый и к поглощающим материалам, заключается в использовании взаимодействия между магнитными и фотовозбужденными носителями при условии, что время рекомбинации фотоносителей намного короче по сравнению с процессом диффузии тепла. Ранее [5, 6] было показано, что короткие лазерные импульсы могут вызывать нетепловую переориентацию спинов в антиферромагнитных (АФМ) материалах гораздо быстрее, чем в ферромагнитных (ФМ). На этой основе созданы ФМ/АФМ-гетероструктуры с обменным взаимодействием [7] и продемонстрировано, что в таких структурах эффективность возбуждения спиновой прецессии существенно выше, чем в чистом ФМ-материале.

В настоящей работе нами исследован магнитооптический отклик многослойных структур TbCo/FeCo на фемтосекундный оптический импульс ближнего ИК-диапазона. Проведено сравнение спиновой динамики при направлении волнового вектора возбуждающего импульса вдоль и перпендикулярно оси легкого намагничивания структур.

Эксперименты выполняли на образцах, состоящих из чередующихся слоев TbCo₂ и FeCo толщиной 5 нм каждый на подложке диоксида кремния (далее будем обозначать их как TbCo/FeCo). Образцы изготавливали методом катодного распыления в постоянном магнитном поле, используемом с целью создания наведенной одноосной магнитной анизотропии в плоскости структуры, как описано в [8]. Полная толщина структур составляла 60 нм.

Образцы тестировали с помощью вибрационного магнетометра¹, кривые намагничивания типичны для одноосных магнитных структур. По данным измерений, величина

¹Тестирование проводили во Франции, в Университете г. Лилль, Институт электроники, микроэлектроники и нанотехнологии – IEMN – UMR 8520, F-59000, Lille, France.

намагниченности насыщения и напряженность поля анизотропии составили, соответственно, $B_s = 5500$ Гс и $H_A = 7$ кЭ. Для направления намагничивания по «легкой оси» определена коэрцитивная сила $H_C = 400$ Э. В качестве источника излучения использовали титан-сапфировый фемтосекундный лазер TiF-20F (ООО «АВЕСТА-ПРОЕКТ», г. Троицк), излучение которого заводилось в оптический усилитель. На выходе из усилителя излучение имело параметры: длина волны 800 нм, частота повторения импульсов 3 кГц, длительность импульса 35 фс. После этого излучение разделялось светоделителем на канал возбуждения и канал зондирования. Плотность энергии на поверхности образца в импульсе возбуждения составляла порядка 0.85 мДж/см², в импульсе зондирования 0.085 мДж/см². Луч накачки перпендикулярен поверхности образца; угол падения зондирующего луча равен 45°. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Образец помещали между сердечниками электромагнита, позволявшего прикладывать магнитное поле до 650 мТ. Поляризация волн возбуждения и зондирования линейная, вектор электрического поля обеих волн лежал в той же плоскости, что и вектор напряженности магнитного поля электромагнита. Вращением вокруг нормали к поверхности образец устанавливали в двух положениях так, чтобы волновой вектор возбуждающего импульса ориентировался либо вдоль, либо перпендикулярно оси легкого намагничивания структуры.

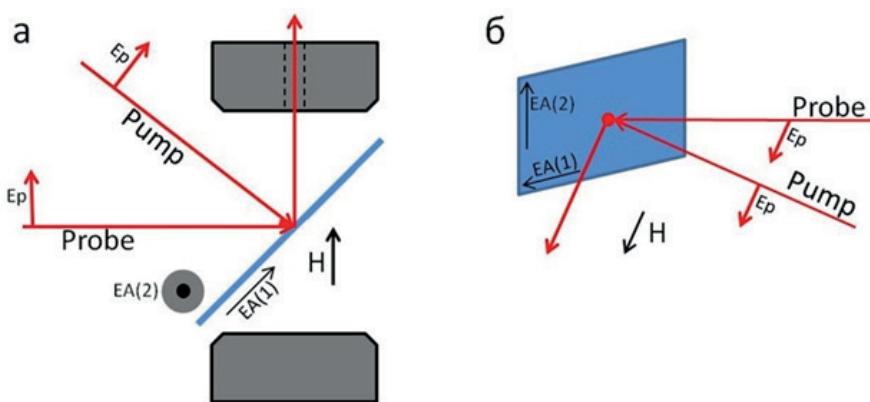


Рис. 1. Схема эксперимента: а – вид сверху, б – вид сбоку.
Цифрами на рисунках обозначены две геометрии эксперимента:
1) «легкая ось» (лежит в плоскости падения);
2) «трудная ось» (перпендикулярна плоскости падения).

Для детектирования применяли балансный фотодиод, который позволяет одновременно определять угол поворота плоскости поляризации и интенсивность отраженной волны. Улучшение отношения сигнал/шум обеспечивалось за счет оптомеханического прерывателя, модулирующего интенсивность возбуждающей волны и синхронизованный с синхронным усилителем.

На рис. 2 представлены результаты исследования возбуждения-релаксации магнитной подсистемы гетероструктуры (TbCo₂/FeCo) при возбуждении ее фемтосекундным лазерным импульсом для случая, когда ось легкого намагничивания образца лежит в плоскости падения (геометрия «легкая ось»). Зависимости угла поворота плоскости поляризации от времени задержки (максимальное время задержки 160 пс) между импульсом зондирования относительно импульса возбуждения имеют вид, характерный для экспери-

ментов оптического возбуждения-зондирования [9]. На временах порядка 1–2 пс происходит возбуждение электронов оптическим импульсом и их термализация, на временах нескольких десятков пикосекунд имеет место несколько процессов: возбуждение спиновой подсистемы, возбуждение фононов за счет электрон-фононного взаимодействия, а также размагничивание; далее все перечисленные процессы со своими постоянными временем каждый релаксируют к исходному состоянию.

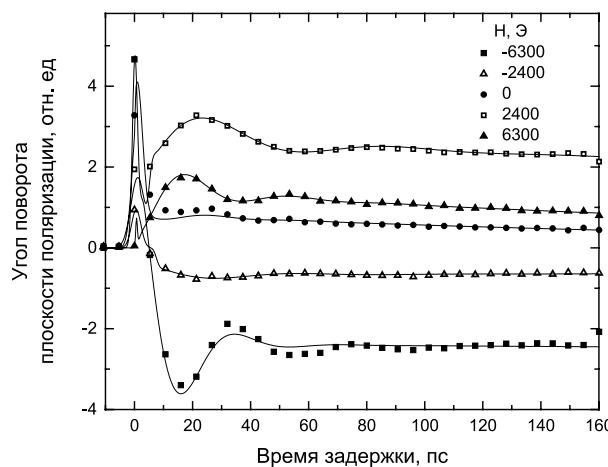


Рис. 2. Геометрия «легкая ось». Зависимость угла поворота плоскости поляризации от времени задержки при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля (точки – экспериментальные зависимости, линии – результаты аппроксимации).

В зависимостях, полученных в наших экспериментах, можно отметить три особенности:

- 1) нечетность по полю, которая выражается в виде симметрии относительно горизонтальной оси кривых, снятых в противоположных по направлению полях;
- 2) при увеличении поля практически сразу же после термализации носителей (1-2 пс) начинают проявляться осцилляции, обусловленные спиновой прецессией; частота осцилляций увеличивается с увеличением поля;
- 3) за время измерения 160 пс, приведенное на рис. 2, а также вплоть до 800 пс (что является пределом используемой установки), не наблюдается релаксации угла поворота поляризации к начальному значению. Следовательно, в геометрии «легкая ось» система достаточно быстро релаксирует к новому состоянию, и вокруг этого нового состояния происходит прецессия спинов.

На рис. 3 представлены результаты аналогичных измерений для случая, когда ось легкого намагничивания образца перпендикулярна плоскости падения (геометрия «трудная ось»). В отличие от предыдущего случая, зависимости являются четными, то есть совпадают (в пределах погрешности) для магнитных полей противоположных знаков и одинаковой величины. В связи с этим временные зависимости угла поворота плоскости поляризации на рис. 3 приведены только для поля одного знака. Характерные особенности этих зависимостей следующие:

- 1) осцилляции спиновой прецессии начинают проявляться только при достаточно значительных временах (в зависимости от поля – в интервале 30–50 пс);
- 2) осцилляции проявляются практически на фоне нулевого сигнала, то есть и само размагничивание, и его релаксация происходят за достаточно короткие времена (30–50 пс), а сама система переходит в начальное состояние.

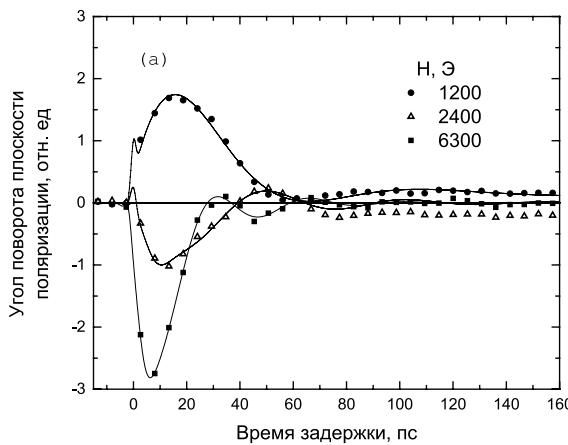


Рис. 3. Геометрия «трудная ось». Зависимость угла поворота плоскости поляризации от времени задержки при различных значениях величины внешнего магнитного поля (точки – экспериментальные зависимости, линии – результаты аппроксимации).

Полученные результаты можно аппроксимировать феноменологической зависимостью (модифицированной на основе работы [10]) для угла керровского вращения:

$$\theta_K = (bg + A \cdot e^{-t/t_0} + B \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_0) \cdot e^{-t/\tau}) (1 - \operatorname{erf}(B - \psi_0 t)),$$

где в первой скобке первый член bg представляет собой фоновый сигнал, близкий к нулю; второй член описывает восстановление намагниченности с постоянной времени t_0 ; третий член описывает затухающую с постоянной времени τ динамику прецессии намагниченности;

f – частота прецессии;

φ_0 – начальная фаза;

A и B – амплитуды соответствующих процессов.

Модификация выражения, приведенного в работе [10], заключается в добавлении множителя с функцией ступеньки, чтобы описать не только релаксацию, но также и возбуждение намагниченности. Результаты аппроксимации – сплошные линии на рис. 2 и 3. Полученные при аппроксимации частоты увеличиваются с ростом магнитного поля и практически совпадают для обеих геометрий «легкой ось» и «трудной» осей.

Приведенные экспериментальные результаты позволяют выявить основные особенности оптически индуцированных процессов в спиновой системе исследуемой гетероструктуры. С феноменологической точки зрения, эти особенности магнитной динамики обусловлены, прежде всего, характером воздействия лазерных импульсов на величину намагниченности и напряженность поля наведенной магнитной анизотропии. В условиях теплового механизма оптического возбуждения естественно ожидать, что оба параметра уменьшаются в результате оптического нагрева. В геометрии «легкая ось» это приводит к уменьшению проекции намагниченности на направление распространения пробного луча. Соответственно, увеличивается отклонение угла поворота поляризации света от равновесного направления в эффекте Керра. При этом отклонение меняет знак при изменении знака намагничивающего поля, что и наблюдается в эксперименте.

В геометрии «трудная ось» отчетливо проявляется зависимость реакции на лазерное возбуждение от исходного состояния магнитной системы. В использованных в эксперименте магнитных полях равновесная намагниченность находится в угловой фазе. В поле наибольшей напряженности $H = 6.3$ кЭ при поле анизотропии $H_A = 7$ кЭ угол между проекцией намагниченности на плоскость образца и «легкой осью» близок к 45° . Уменьшение напряженности поля приводит к повороту намагниченности в сторону «легкой оси». Данные, представленные на рис. 3, соответствуют зависимости угла поворота плоскости поляризации света от напряженности магнитного поля при спиновой переориентации в случае поля, направленного перпендикулярно к «легкой оси». Поскольку лазерное возбуждение проводится при скомпенсированном равновесном повороте плоскости поляризации, строгая корреляция динамического отклика с ориентацией намагниченности в равновесном состоянии указывает на частичное оптическое разрушение исходного анизотропного магнитного состояния. На начальном этапе намагниченность разворачивается к магнитному полю, а затем, прецессируя, релаксирует к равновесной угловой ориентации. Такая динамика указывает на быстрое восстановление величины поля одноосной анизотропии после лазерного воздействия.

В заключение отметим, что представленные результаты демонстрируют сверхбыстро изменение магнитной анизотропии, наведенной в процессе изготовления исследуемой гетероструктуры, что может представлять интерес для оптического управления ориентацией намагниченности. Обнаруженные в геометрии «легкая ось» длительные релаксационные процессы на временах, превосходящих время измерений, требуют самостоятельного исследования.

Работа выполнена при поддержке CNRS и РФФИ (грант № 18-52-16021), а также Минобрнауки в рамках госзадания вузам (16.4699.2017/6.7 и 3.1923.2017/4.6).

Литература:

1. Sander D., Valenzuela S.O., Makarov D., Marrows C.H., Fullerton E.E., Fischer P., McCord J., Vavassori P., Mangin S., Pirro P., Hillebrands B., Kent A.D., Jungwirth T., Gutfleisch O., Kim C.G., Berger A. The 2017 Magnetism Roadmap // J. Phys. D. Appl. Phys. 2017. V. 50. № 36. P. 363001 (33 pp.).
2. 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. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.4250>
3. Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T. Ultrafast optical manipulation of magnetic order // Rev. Mod. Phys. 2010. V. 82. № 3. P. 2731–2784. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.2731>
4. Stupakiewicz A., Szerenos K., Afanasiev D., Kirilyuk A., Kimel A.V. Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in a transparent medium // Nature. 2017. V. 542. № 7639. P. 71–74.
5. Kimel A.V., Kirilyuk A., Tsvetkov A., Pisarev R. V., Rasing T. Laser-induced ultrafast spin reorientation in the antiferromagnet $TmFeO_3$ // Nature. 2004. V. 429. № 6994. P. 850–853. DOI: 10.1038/nature 02659.
6. Kimel A.V., Kirilyuk A., Usachev P.A., Pisarev R. V., Balbashov A.M., Rasing T. Ultrafast non-thermal control of magnetization by instantaneous photomagnetic pulses // Nature. 2005. V. 435. № 7042. P. 655–657. DOI: 10.1038/nature 03564.
7. Ma X., Fang F., Li Q., Zhu J., Yang Y., Wu Y.Z., Zhao H.B., Lüpke G. Ultrafast spin exchange-coupling torque via photo-excited charge-transfer processes. // Nat. Commun. 2015. V. 6. № 1. P. 8800. DOI: 10.1038/ncomms9800.

8. Klimov A., Tiercelin N., Preobrazhensky V., Pernod P. Inhomogeneous spin reorientation transition (SRT) in giant magnetostrictive $TbCo_2/FeCo$ multilayers // INTERMAG 2006 – IEEE International Magnetics Conference. 2006. P. 452–452. <https://doi.org/10.1109/INTMAG.2006.376176>
9. Koopmans B., Malinowski G., Dalla Longa F., Steiauf D., Fähnle M., Roth T., Cinchetti M., Aeschlimann M. Explaining the paradoxical diversity of ultrafast laser-induced demagnetization // Nature Materials. 2009. V. 9. № 3. P. 259–265. DOI: 10.1038/NMAT2593
10. He P., Ma X., Zhang J.W., Zhao H.B., Lüpke G., Shi Z., Zhou S.M. Quadratic scaling of intrinsic gilbert damping with spin-orbital coupling in $FePdPt$ films: Experiments and *Ab Initio* calculations // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. № 7. P. 077203-5. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.077203

References:

1. Sander D., Valenzuela S.O., Makarov D., Marrows C.H., Fullerton E.E., Fischer P., McCord J., Vavassori P., Mangin S., Pirro P., Hillebrands B., Kent A.D., Jungwirth T., Gutfleisch O., Kim C.G., Berger A. The 2017 Magnetism Roadmap. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2017; 50(36): 363001 (33 pp.).
2. Beaurepaire E., Merle J.-C., Daunois A., Bigot J.-Y. Ultrafast spin dynamics in ferromagnetic nickel. *Phys. Rev. Lett.* 1996; 76(22):4250-4253. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.4250>
3. Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T. Ultrafast optical manipulation of magnetic order. *Rev. Mod. Phys.* 2010; 82(3): 2731-2784. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.2731>
4. Stupakiewicz A., Szerenos K., Afanasiev D., Kirilyuk A., Kimel A.V. Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in a transparent medium. *Nature*. 2017; 542(7639): 71-74.
5. Kimel A.V., Kirilyuk A., Tsvetkov A., Pisarev R.V., Rasing T. Laser-induced ultrafast spin reorientation in the antiferromagnet $TmFeO_3$. *Nature*. 2004; 429(6994):850-853. DOI: 10.1038/nature02659.
6. Kimel A.V., Kirilyuk A., Usachev P.A., Pisarev R.V., Balbashov A.M., Rasing T. Ultrafast non-thermal control of magnetization by instantaneous photomagnetic pulses. *Nature*. 2005; 435(7042):655-657. DOI: 10.1038/nature03564.
7. Ma X., Fang F., Li Q., Zhu J., Yang Y., Wu Y.Z., Zhao H.B., Lüpke G. Ultrafast spin exchange-coupling torque via photo-excited charge-transfer processes. *Nat. Commun.* 2015; 6(1):8800. DOI: 10.1038/ncomms9800.
8. Klimov A., Tiercelin N., Preobrazhensky V., Pernod P. Inhomogeneous spin reorientation transition (SRT) in giant magnetostrictive $TbCo_2/FeCo$ multilayers. *INTERMAG 2006 – IEEE International Magnetics Conference*. 2006; 452-452. <https://doi.org/10.1109/INTMAG.2006.376176>
9. Koopmans B., Malinowski G., Dalla Longa F., Steiauf D., Fähnle M., Roth T., Cinchetti M., Aeschlimann M. Explaining the paradoxical diversity of ultrafast laser-induced demagnetization. *Nature Materials*. 2009; 9(3):259-265. DOI: 10.1038/NMAT2593
10. He P., Ma X., Zhang J.W., Zhao H.B., Lüpke G., Shi Z., Zhou S.M. Quadratic scaling of intrinsic gilbert damping with spin-orbital coupling in $FePdPt$ films: Experiments and *Ab Initio* calculations. *Phys. Rev. Lett.* 2013; 110(7):077203-5. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.077203

Об авторах:

Ильин Никита Александрович, кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории фемтосекундной оптики для нанотехнологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Author ID: 18037137700. E-mail: alexander-nick@bk.ru

Климов Алексей Анатольевич, кандидат физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры информационных систем Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Author ID: 35391085300. E-mail: klimov@mirea.ru

Tiercelin Nicolas, Charge de Recherche CNRS-HDR, Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 – IEMN, 59651 Villeneuve d'Ascq, France. <http://orcid.org/0000-0001-7400-4272>, Author ID: 6603515103. E-mail: nicolas.tiercelin@univ-lille.fr

Pernod Philippe, CNRS-HDR, Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 – IEMN, 59651 Villeneuve d'Ascq, France. Author ID: 7003429648. E-mail: philippe.pernod@iemn.univ-lille.fr

Мишина Елена Дмитриевна, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <http://orcid.org/0000-0003-0387-5016>, Author ID: 7005350309. E-mail: mishina_elena57@mail.ru

Гапонов Михаил Станиславович, аспирант кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <https://orcid.org/0000-0003-0003-5054>. E-mail: gaponov.m.s@yandex.ru

Брехов Кирилл Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории фемтосекундной оптики для нанотехнологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <http://orcid.org/0000-0001-9091-2609>, Author ID: 55452447100, E-mail: brekhov_ka@mail.ru

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой наноэлектроники Физико-технологического института, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Author ID: 35557510600. E-mail: sigov@mirea.ru

Преображенский Владимир Леонидович, доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 38). <http://orcid.org/0000-0002-6206-5948>, Author ID: 7004493603. E-mail: preobr@newmail.ru

About the authors:

Nikita A. Ilyin, Ph.D. (Physics and Mathematics), Researcher of the Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Author ID: 18037137700. E-mail: alexander-nick@bk.ru

Alexey A. Klimov, Ph.D. (Physics and Mathematics), Docent, Associate Professor of the Chair of Information Systems, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Author ID: 35391085300. E-mail: klimov@mirea.ru

Nicolas Tiercelin, Charge de Recherche CNRS-HDR, Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 – IEMN, 59651 Villeneuve d'Ascq, France. <http://orcid.org/0000-0001-7400-4272>. Author ID: 6603515103. E-mail: nicolas.tiercelin@univ-lille.fr

Philippe Pernod, CNRS-HDR, Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 – IEMN, 59651 Villeneuve d'Ascq, France, Author ID: 7003429648. E-mail: philippe.pernod@iemn.univ-lille.fr

Elena D. Mishina, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0003-0387-5016>, Author ID: 7005350309. E-mail: mishina_elena57@mail.ru

Mikhail S. Gaponov, Postgraduate Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <https://orcid.org/0000-0003-0003-5054>. E-mail: gaponov.m.s@yandex.ru

Kirill A. Brekhov, Junior Researcher of the Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0001-9091-2609>, Author ID: 55452447100. E-mail: brekhov_ka@mail.ru

Alexander S. Sigov, Academician, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology of the MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Author ID: 35557510600. E-mail: sigov@mirea.ru

Vladimir L. Preobrazhensky, D.Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher of the A.M. Prokhorov Institute of General Physics RAS (38, Vavilova st., Moscow 119991, Russia). <http://orcid.org/0000-0002-6206-5948>, Author ID: 7004493603. E-mail: preobr@newmail.ru

Для цитирования: Ильин Н.А., Климов А.А., Tiercelin N., Pernod P., Мишина Е.Д., Гапонов М.С., Брехов К.А., Сигов А.С., Преображенский В.Л. Динамика намагниченности в многослойных структурах TbCo/FeCo под действием фемтосекундного оптического возбуждения // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 50–58. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-50-58

For citation: Ilyin N.A., Klimov A.A., Tiercelin N., Pernod P., Mishina E.D., Gaponov M.S., Brekhov K.A., Sigov A.S., Preobrazhensky V.L. Dynamics of magnetization in multilayer TbCo / FeCo structures under the influence of femtosecond optical excitation *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(3):50-58. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-50-58