

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-58-66>



УДК 53.084

Лазерно-индуцированная спиновая динамика в пленке железо-иттриевого граната, легированного ионами Si

С.В. Овчаренко¹,
М.С. Гапонов¹,
Н.А. Ильин¹,
М.В. Логунов²,
Anhua Wu³,
Е.Д. Мишина^{1,@}

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Москва 125009, Россия

³Шанхайский институт керамики, Китайская академия наук, Шанхай 200050, Китайская Народная Республика

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

Непрерывный рост объема хранимых и обрабатываемых данных проводит к ужесточению требований к носителям информации. Наиболее распространенная в настоящее время технология хранения информации основана на магнитных материалах, где информации в виде «0» и «1» ставится в соответствие локальное направление намагниченности, определяемое внешним магнитным полем, создаваемым устройством записи. Известно, что данный подход имеет фундаментальное ограничение по скорости записи, которое почти достигнуто. Также ужесточаются требования к энергоэффективности носителей данных. Данные обстоятельства приводят к развитию альтернативных подходов к записи информации. Один из таких подходов был продемонстрирован в области сверхбыстрого оптомагнетизма, которая бурно развивается в последние 20 лет. Этот подход заключается в записи информации короткими оптическими импульсами без приложения внешнего магнитного поля. Однако он требует фундаментальных исследований физических процессов, а также материалов, в которых возможно управление намагниченностью короткими оптическими импульсами. В данной работе рассматривается спиновая динамика в магнитном диэлектрике: пленке железо-иттриевого граната легированного кремнием. Исследования проводились с помощью методики накачки – зондирования на временном диапазоне до 800 нс. Размер пятна составил 30 мкм,

длительность оптического импульса 35 фс, плотность мощности излучения накачки около 50 мДж/см². Показано, что изменение констант магнитокристаллической анизотропии вследствие воздействия на структуру возбуждающим импульсом вызывает долготухающую прецессию намагниченности с периодом порядка 200 пс. Получены и проанализированы зависимости амплитуды, фазы и затухания прецессии от величины внешнего магнитного поля в диапазоне до 1.84 кЭ. Изученные процессы могут быть рассмотрены в рамках модели Ландау-Лифшица-Гилберта, и представлять интерес для оптического переключения намагниченности, а также создания различных спинтронных устройств. Показано, что пленки железо-иттриевого граната, легированного кремнием, являются перспективным материалом для магнитных носителей информации на основе сверхбыстрого оптомагнетизма.

Ключевые слова: фотоиндуцированная сверхбыстрая динамика, спинтроника, доменная структура, оптическое управление намагниченностью, фемтосекундное лазерное излучение.

Для цитирования: Овчаренко С.В., Гапонов М.С., Ильин Н.А., Логунов М.В., Wu Anhua, Мишина Е.Д. Лазерно-индуцированная спиновая динамика в пленке железо-иттриевого граната, легированного ионами Si. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):58-66. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-58-66>

Laser-induced spin dynamics in the iron-yttrium garnet film doped with Si ions

Sergey V. Ovcharenko¹,
Mikhail S. Gaponov¹,
Nikita A. Ilyin¹,
Mikhail V. Logunov²,
Anhua Wu³,
Elena D. Mishina^{1,@}

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²Kotelnikov Institute of Radioengineering & Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow 125009, Russia

³Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, 200050 Shanghai, People's Republic of China

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

A continuous increase in the volume of stored and processed data leads to stricter requirements for storage media. The most common information storage technology is currently based on magnetic materials, where information in the form of "0" and "1" is associated with the local direction of magnetization, determined by the external magnetic field created by the recording device. It is known that this approach has fundamental limitations on the recording speed which is almost achieved. The requirements for energy efficiency of storage media are also being made stricter. These circumstances lead to the development of alternative approaches to recording information. One of these approaches has been demonstrated in the field of ultrafast opto-magnetism, which has been booming over the past 20 years. It consists in recording information with short

optical pulses without the application of an external magnetic field. However, it requires fundamental studies of physical processes, as well as materials, in which magnetization can be controlled by short optical pulses. In this paper, we consider the spin dynamics in a magnetic dielectric: a film of iron - yttrium garnet doped with silicon. The studies were carried out using the pump – probe technique over a time range of up to 800 ns. The spot size was 30 μm , the optical pulse duration was 35 fs, and the pump fluence was about 50 mJ / cm^2 . It is shown that a change in the magnetocrystalline anisotropy constants due to the action of a pump pulse on the structure causes a long-decaying magnetization precession with a period of about 200 ps. The dependences of the amplitude, phase, and decay of the precession on the magnitude of the external magnetic field in the range up to 1.84 kOe were obtained and analyzed. The studied processes can be considered on the basis of the Landau-Lifshitz-Gilbert model, and be of interest for the optical switching of magnetization, as well as the creation of various spintronic devices. It is shown that films of iron-yttrium garnet doped with silicon are a promising material for magnetic information carriers based on ultrafast opto-magnetism.

Keywords: photoinduced ultrafast dynamics, spintronics, domain structure, optical control of magnetization, femtosecond laser radiation.

For citation: Ovcharenko S.V., Gaponov M.S., Ilyin N.A., Logunov M.V., Wu Anhua, Mishina E.D. Laser-induced spin dynamics in the iron-yttrium garnet film doped with Si ions. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):58-66 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-58-66>

Введение

Несмотря на более чем столетнюю историю магнитооптических эффектов и их широчайшее использование в фундаментальных исследованиях и различных устройствах, каждое десятилетие выявляются новые области их применения, в частности, связанные с уменьшением пространственных и временных масштабов, на которых наблюдаются данные эффекты. На микроуровне развиты, например, термокартирование [1], импульсная микролазерная генерация с использованием магнитооптических модуляторов добротности [2], послойное картирование намагниченности в двумерных ферромагнетиках [3], рассмотрены эффекты усиления в магнитоплазменных структурах [4]. При этом применение внешних магнитных полей для управления магнитным моментом все еще является основной концепцией, например, в технологиях хранения информации, основанных на магнитных носителях. Однако ограничения, связанные с масштабированием и энергетической неэффективностью, вызванные использованием электрических токов для генерации магнитных полей, стимулируют активные исследования в поиске альтернативных способов управления магнитным порядком.

Бурное развитие получил в последние годы сверхбыстрый оптомагнетизм – раздел магнетизма, основанный на использовании обратных магнитооптических эффектов, в котором управление спиновой подсистемой твердого тела осуществляется оптическим импульсом без приложения внешнего магнитного поля [5]. Начало оптомагнетизма связывают с открытием сверхбыстрого размагничивания в ферромагнитном никеле в 1996 году [6]. Благодаря интенсивным исследованиям в этой области впоследствии было обнаружено сверхбыстрое полностью оптическое переключение намагниченности в различных материалах: пленках сплавов редкоземельных и переходных металлов, диэлектриках, гетероструктурах [7]. С точки зрения практической применимости наиболее

интересными объектами исследования являются тонкие пленки магнитных диэлектриков, обладающих незначительным поглощением в ближнем ИК и видимом спектральных диапазонах (в данном спектральном диапазоне работают наиболее распространенные коммерческие фемтосекундные лазеры), и, как следствие, меньшими Джоулевыми потерями.

Модельным материалом изучения сверхбыстрой динамики намагниченности в диэлектриках являются пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), широко применяемые в микроволновых и магнитооптических устройствах. В первых работах по исследованию динамики намагниченности в пленках ЖИГ было продемонстрировано возбуждение спиновой прецессии [8, 9], анализ параметров которой привел к экспериментальной демонстрации переключения намагниченности [10]. Более того, в настоящее время сформулированы «правила», на основе которых реализовано обратимое переключение магнитного порядка в железо-иттриевом гранате, легированном ионами кобальта (ЖИГ:Co) [11] без приложения внешнего поля.

Исследование динамики намагниченности в различных магнитных диэлектриках позволит более детально прояснить механизмы, отвечающие за сверхбыструю динамику намагниченности. Явными кандидатами для таких исследований являются материалы, в которых ранее была продемонстрирована эффективная оптическая запись в квазистатическом режиме [12].

В данной работе представлены результаты исследования спиновой динамики в железо-иттриевом гранате, легированном ионами кремния (ЖИГ:Si).

Методика эксперимента

Пленка ЖИГ:Si толщиной 4.8 мкм была выращена методом жидкофазной эпитаксии на подложке гадолиний–галлиевого граната (ГГГ). Эксперимент проводился с помощью методики оптического возбуждения – зондирования (*optical pump-probe*), в качестве источника лазерного излучения использовалась фемтосекундная титан-сапфировая лазерная система TiF-20F (ООО «АВЕСТА-ПРОЕКТ», г. Троицк) с регенеративным усилителем, обеспечивающей длительность импульса 35 фс на частоте 3кГц, среднюю мощность излучения 600 мВт. Длина волны зондирующего излучения – 800 нм, излучения накачки – 400 нм (получена с помощью нелинейно оптического кристалла). Диаметр световых пятен в фокусе накачки и зондирования составлял 30 мкм, а плотность мощности для импульсов накачки и зондирования ~ 50 мДж/см² и ~ 0.5 мДж/см² соответственно. Была выбрана типичная схема для регистрации магнитооптического эффекта Фарадея, геометрия эксперимента аналогична используемой в работе [13]. Угол падения излучения накачки с нормалью к поверхности образца составлял $\sim 15^\circ$. Направление зондирующего луча совпадало с нормалью к плоскости образца. Поляризация падающих импульсов для приведенных зависимостей была линейной (P). Сигнал регистрировался балансным фотодетектором, позволяющим регистрировать фотоиндуцированные изменения поворота плоскости поляризации проходящего света и изменение его интенсивности (изменение коэффициента пропускания). Улучшение отношения сигнал/шум обеспечивалось за счет методики синхронного детектирования: синхронизированный с оптомеханическим прерывателем, модулирующим интенсивность возбуждающей волны, синхронный усилитель регистрировал изменения в зондирующем сигнале.

Результаты и их обсуждение

Динамика фотоиндуцированного магнитооптического эффекта Фарадея в пленке ЖИГ:Si с внешним полем H_{ext} , прикладываемом в плоскости образца, представлена на рис. 1.

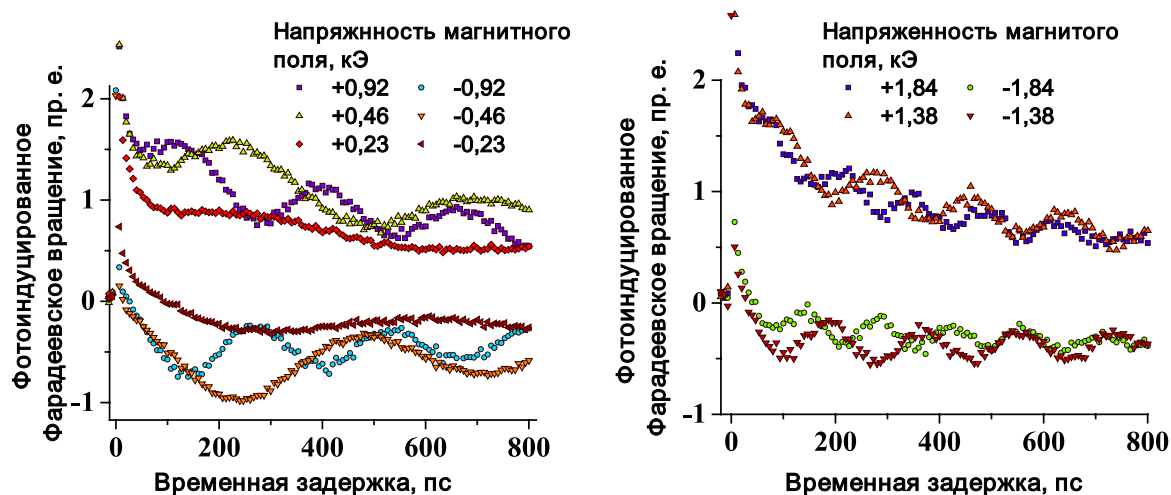


Рис. 1. Динамика фотоиндуцированного магнитооптического эффекта Фарадея в пленке ЖИГ:Si при различных внешних полях от 0.23 кЭ до 1.84 кЭ.

Измерения имеют характерный вид для экспериментов оптического возбуждения – зондирования [14]: на временах до 10 пс происходит возбуждение электронной системы оптическим импульсом и ее термализация. Далее наблюдаются осцилляции фотоиндуцированного Фарадеевского вращения, которые демонстрируют затухающую прецессию намагниченности с показателем затухания существенно выше временного разрешения проведенного эксперимента. Стоит отметить, что вызванная прецессия не зависит от поляризации накачки, что может говорить о том, что в данном эксперименте работает тепловой механизм оптического изменения магнитокристаллической анизотропии (δK -процесс), описанный в работе [5]. Тот факт, что внешнее поле H_{ext} , направлено в плоскости образца, исключает возможность возникновения изменения анизотропии формы (δM -процесса), описание которой было продемонстрировано в работе [15], однако существенным отличием нашей работы от [5] является то, что при изменении знака приложенного внешнего поля осцилляции имеют не определенный сдвиг по фазе, а находятся в противофазе, что может говорить о противоположном начальном направлении движения намагниченности, задающем фазу прецессии. Большим отличием является также длительность прецессии намагниченности, которая, как мы предполагаем, связана с более сильным изменением полного эффективного магнитного поля δH_{eff} .

На рис. 2 представлены петли гистерезиса фотоиндуцированного магнитооптического эффекта Фарадея при фиксированном времени задержки (0 и 300 пс). Петля гистерезиса во временной задержке 0 пс, соответствует времени, при котором импульс накачки и зондирования приходят одновременно и позволяет охарактеризовать основные параметры исследуемого образца с учетом возбуждения системы, до термализации носителей и возникновения прецессии намагниченности. Исходя из полученных данных, можно сделать

вывод, что поле насыщения B_H исследуемой пленки ЖИГ:Si в момент воздействия импульса возбуждения составляет ~ 0.5 кЭ, а размер коэрцитивной силы H_c равен в данном случае ~ 0.1 кЭ.

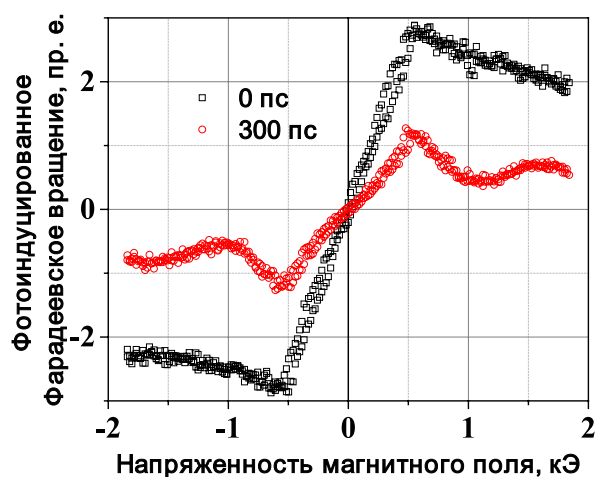


Рис. 2. Фотоиндуцированные петли гистерезиса во временной задержке 0 и 300 пс.

Если же рассматривать фотоиндуцированную петлю гистерезиса во временной задержке 300 пс, можно отметить, что после термализации носителей и с учетом ферромагнитного резонанса (ФМР), поле насыщения B_H в исследуемом образце не изменилось, а величина коэрцитивной силы H_c уменьшилась вдвое. Предполагается, что возбуждение ФМР происходит за счет фотоиндуцированного изменения поля анизотропии. Как видно из рис. 2 (задержка 300 пс), фотоиндуцированное изменение поля анизотропии проявляется в магнитном поле, превышающем поле насыщения для данного образца более, чем в 2 раза.

Полученные результаты были аппроксимированы феноменологической зависимостью фотоиндуцированного угла Фарадеевского вращения от времени задержки, являющейся типичной для экспериментов возбуждения – зондирования [16].

$$y = A \exp\left(\frac{-(x-x_0)^2}{w^2}\right) + B \exp(-decay_1 \times x) + C \exp(-decay_2 \times x) \sin(\varphi_1 + 2\pi\omega_1 x) + \\ + \frac{1}{2} D \exp(-decay_3 \times x) \sin(\varphi_2 + 2\pi\omega_2 x) (1 - \operatorname{erf}(\operatorname{StepAmp} - \operatorname{StepPhase} \times x))$$

Такая аппроксимация позволяет получить основные параметры ФМР при различных значениях приложенного внешнего магнитного поля H_{ext} : амплитуду, частоту и константу затухания прецессии намагниченности (рис. 3). Анализируя полученные значения, можно заметить, что частота ФМР практически линейно возрастает с увеличением поля. При этом амплитуда прецессии намагниченности имеет резкий скачок при величине внешнего поля $H_{ext} = 0.46$ кЭ. Это может быть связано с более высоким вкладом оптического изменения магнитокристаллической анизотропии, который обычно проявляется сильнее при низких внешних полях [5].

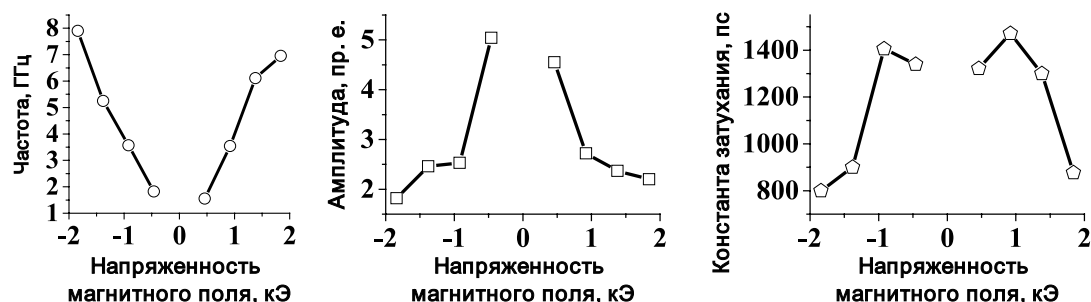


Рис. 3. Параметры ФМР, полученные в результате аппроксимации.

Полученные значения констант затухания показывают, что наиболее длительные осцилляции наблюдаются при величине внешнего поля $H_{\text{ext}} = 0.46$ кЭ и $H_{\text{ext}} = 0.92$ кЭ. Поскольку поле насыщения B_n исследуемой пленки ЖИГ:Si в возбужденном состоянии составляет ~ 0.5 кЭ, можно сделать вывод о том, что образование доменной структуры и ее нестабильность в полях, близких к полю насыщения, является одним из условий лазерно-индуцированного изменения констант магнитной анизотропии пленки феррита-граната, и проявляется в виде возникновения прецессии намагниченности с большим временем затухания. Мы считаем, что этот эффект в дальнейшем может способствовать нахождению условий полностью оптического переключения намагниченности в пленках ферритов-гранатов, легированных кремнием.

Заключение

Представленные результаты показывают возможность эффективного возбуждения лазерно-индуцированной спиновой прецессии в исследуемых пленках. Это позволяет рассматривать пленки ЖИГ:Si как перспективный материал для осуществления полностью оптического переключения намагниченности. Для создания детальной «дорожной карты» для такого переключения, однако, требуются дальнейшие исследования.

Благодарности

Авторы выражают свою признательность А.В. Кимелю за ценные консультации. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-52-53030 ГФЕН_а). Образцы изготовлены М.В. Логуновым, работа поддержана РФФИ (грант № 18-29-27020_мк).

Литература:

1. Kustov M., Grechishkin R., Gusev M., Gasanov O., McCord J. A Novel Scheme of Thermographic Microimaging Using Pyro-Magneto-Optical Indicator Films. *Adv. Mater.* 2015;27(34):5017-5022. <https://doi.org/10.1002/adma.201501859>
2. Goto T., Morimoto R., Pritchard J.W., Mina M., Takagi H., Nakamura Y., Lim P.B., Taira T., Inoue M. Magneto-optical Q-switching using magnetic garnet film with micro magnetic domains. *Opt. Express.* 2016;24(16):17635-17643. <https://doi.org/10.1364/OE.24.017635>
3. Huang B., Clark, G., Navarro-Moratalla E., Klein D., Cheng R., Seyler K.L., Zhong D., Schmidgall E. Layer-dependent ferromagnetism in a van der Waals crystal down to the monolayer limit. *Nature.* 2017;546(7657):270-273. <https://doi.org/10.1038/nature22391>
4. Liu M., Zhang X. Plasmon-boosted magneto-optics. *Nat. Photonics.* 2013;7(6):429-430. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.134>
5. Баранов П.Г., Калашникова А.М., Козуб В.И., Коренев В.Л., Кусраев Ю.Г., Писарев Р.В., Сапега В.Ф., Акимов И.А., Байер М., Щербаков А.В., Яковлев Д.Р. Спинтроника полупроводниковых, металлических, диэлектрических и гибридных структур» (к 100-летию Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН). *Успехи физических наук.* 2019;189:849-880. <https://doi.org/10.3367/UfNr.2018.11.038486>
6. Beaurepaire E., Merle J.C., Daunois A., Bigot J.Y. Ultrafast spin dynamics in ferromagnetic nickel. *Phys Rev Lett.* 1996;76(22):4250-4253. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.4250>

7. Kimel A.V., Li M. Writing magnetic memory with ultrashort light pulses. *Nat. Rev. Mater.* 2019;4(3):189-200. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0086-3>
8. Hansteen F., Kimel A., Kirilyuk A., Rasing T. Femtosecond photomagnetic switching of spins in ferrimagnetic garnet films. *Phys. Rev. Lett.* 2005;95(4):1-4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.047402>
9. Hansteen F., Kimel A., Kirilyuk A., Rasing T. Nonthermal ultrafast optical control of the magnetization in garnet films. *Phys. Rev. B.* 2006;73(1):article № 014421. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.014421>
10. Stupakiewicz A., Szerenos K., Afanasiev D., Kirilyuk A., Kimel A.V. Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in a transparent medium. *Nature* [Internet]. 2017;542(7639):71-74. <https://doi.org/10.1038/nature20807>
11. Stupakiewicz A., Szerenos K., Davydova M.D., Zvezdin K.A., Zvezdin A.K., Kirilyuk A. Selection rules for all-optical magnetic recording in iron garnet. *Nat. Commun.* 2019;10(1):article № 612. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08458-w>
12. Коваленко В., Колежук Е., Куц П. Фотомагнитная запись информации. *Письма в ЖТФ.* 1981;7(16):1012-1016.
13. Atoneche F., Kalashnikova A.M., Kimel A.V., Stupakiewicz A., Maziewski A., Kirilyuk A., et al. Large ultrafast photoinduced magnetic anisotropy in a cobalt-substituted yttrium iron garnet. *Phys. Rev. B.* 2010;81(21):article № 214440. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.214440>
14. Koopmans B., Malinowski G., Dalla Longa F., Steiauf D., Fähnle M., Roth T., et al. Explaining the paradoxical diversity of ultrafast laser-induced demagnetization. *Nat. Mater.* 2010;9(3):259-265. <https://doi.org/10.1038/nmat2593>
15. van Kampen M., Jozsa C., Kohlhepp J.T., LeClair P., Lagae L., de Jonge W.J.M., et al. All-Optical Probe of Coherent Spin Waves. *Phys. Rev. Lett.* 2002;88(22):article № 227201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.227201>
16. Kimel A.V., Bentivegna F., Gridnev V.N., Pavlov V.V., Pisarev R.V., Rasing T. Room-temperature ultrafast carrier and spin dynamics in GaAs probed by the photoinduced magneto-optical Kerr effect. *Phys. Rev. B.* 2001;63(23):article № 235201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.63.235201>

References:

1. Kustov M., Grechishkin R., Gusev M., Gasanov O., McCord J. A Novel Scheme of Thermographic Microimaging Using Pyro-Magneto-Optical Indicator Films. *Adv Mater.* 2015;27(34):5017-22. <https://doi.org/10.1002/adma.201501859>
2. Goto T., Morimoto R., Pritchard J.W., Mina M., Takagi H., Nakamura Y., Lim P.B., Taira T., Inoue M. Magneto-optical Q-switching using magnetic garnet film with micro magnetic domains. *Opt. Express.* 2016;24(16):17635-17643. <https://doi.org/10.1364/OE.24.017635>
3. Huang B., Clark, G., Navarro-Moratalla E., Klein D., Cheng R., Seyler K.L., Zhong D., Schmidgall E. Layer-dependent ferromagnetism in a van der Waals crystal down to the monolayer limit. *Nature.* 2017;546(7657):270-273. <https://doi.org/10.1038/nature22391>
4. Liu M., Zhang X. Plasmon-boostered magneto-optics. *Nat. Photonics.* 2013;7(6):429-430. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.134>
5. Baranov P.G., Kalashnikova A.M., Kozub V.I., Korenev V.L., Kusrayev Y.G., Pisarev R.V. et al. Spintronics of semiconductor, metallic, dielectric, and hybrid structures (100th anniversary of the Ioffe Institute). *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi.* 2018;189(08):849-880 (in Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.11.038486>
6. Beaurepaire E., Merle J.C., Daunois A., Bigot J.Y. Ultrafast spin dynamics in ferromagnetic nickel. *Phys. Rev. Lett.* 1996;76(22):4250-4253. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.4250>
7. Kimel A.V., Li M. Writing magnetic memory with ultrashort light pulses. *Nat. Rev. Mater.* 2019;4(3):189-200. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0086-3>
8. Hansteen F., Kimel A., Kirilyuk A., Rasing T. Femtosecond photomagnetic switching of spins in ferrimagnetic garnet films. *Phys. Rev. Lett.* 2005;95(4):1-4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.047402>
9. Hansteen F., Kimel A., Kirilyuk A., Rasing T. Nonthermal ultrafast optical control of the magnetization in garnet films. *Phys. Rev. B.* 2006;73(1):014421. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.014421>
10. Stupakiewicz A., Szerenos K., Afanasiev D., Kirilyuk A., Kimel A.V. Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in a transparent medium. *Nature* [Internet]. 2017;542(7639):71-74. <https://doi.org/10.1038/nature20807>
11. Stupakiewicz A., Szerenos K., Davydova M.D., Zvezdin K.A., Zvezdin A.K., Kirilyuk A. Selection rules for all-optical magnetic recording in iron garnet. *Nat. Commun.* 2019;10(1):612. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08458-w>
12. Kovalenko V., Kolezhuk E., Kuts P. Photomagnetic recording of information. *Pis'ma v ZhTF – Technical Physics Letters.* 1981;7(16):1012-1016 (in Russ.).
13. Atoneche F., Kalashnikova A.M., Kimel A.V., Stupakiewicz A., Maziewski A., Kirilyuk A. Large ultrafast photoinduced magnetic anisotropy in a cobalt-substituted yttrium iron garnet. *Phys. Rev. B.* 2010;81(21):214440. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.214440>
14. Koopmans B., Malinowski G., Dalla Longa F., Steiauf D., Fähnle M., Roth T., et al. Explaining the paradoxical diversity of ultrafast laser-induced demagnetization. *Nat. Mater.* 2010;9(3):259-65. <https://doi.org/10.1038/nmat2593>
15. van Kampen M., Jozsa C., Kohlhepp J.T., LeClair P., Lagae L., de Jonge W.J.M. All-Optical Probe of Coherent Spin Waves. *Phys. Rev. Lett.* 2002;88(22):227201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.227201>
16. Kimel A.V., Bentivegna F., Gridnev V.N., Pavlov V.V., Pisarev R.V., Rasing T. Room-temperature ultrafast carrier and spin dynamics in GaAs probed by the photoinduced magneto-optical Kerr effect. *Phys. Rev. B.* 2001;63(23):235201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.63.235201>

Об авторах

Овчаренко Сергей Вадимович, аспирант кафедры нанoeлектроники Физико - технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ORCID: 0000-0002-6360-3672

Гапонов Михаил Станиславович, аспирант кафедры нанoeлектроники Физико - технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ORCID: 0000-0003-0003-5054

Ильин Никита Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Физико - технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Author ID: 18037137700

Логунов Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (125009, Россия, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп.7). ResearcherID: J-9486-2013

Anhua Wu, профессор Центра исследования кристаллов института керамики Шанхая Китайской Академии наук (200050, Китай, Шанхай, 1295 Dingxi Rd). ORCID: 0000-0002-0979-8085

Мишина Елена Дмитриевна, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры нанoeлектроники Физико - технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ORCID: 0000-0003-0387-5016, ResearcherID: D-6402-2014, Scopus Author ID: 7005350309

About the authors:

Sergey V. Ovcharenko, Postgraduate Student of the Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ORCID: 0000-0002-6360-3672

Mikhail S. Gaponov, Postgraduate Student of the Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ORCID: 0000-0003-0003-5054

Nikita A. Ilyin, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Physics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Author ID: 18037137700

Mikhail V. Logunov, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Leading Researcher, Kotel'nikov Institut of Radio Engineering and Electronics RAS (125009, Russia, Moscow, 11 Mokhovaya St., building 7). ResearcherID: J-9486-2013

Anhua Wu, Professor, Center for Crystal Research, Institute of Ceramics, Shanghai, Chinese Academy of Sciences (200050, China, Shanghai, 1295 Dingxi Rd). ORCID: 0000-0002-0979-8085

Elena D. Mishina, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ORCID: 0000-0003-0387-5016, ResearcherID: D-6402-2014, Scopus Author ID: 7005350309