

УДК 004.083

*В.П. Пискорский¹, Р.А. Валеев¹, Д.В. Королев¹,
Ю.В. Столянков¹, Р.Б. Моргунов¹*

**ТЕХНОЛОГИИ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ
ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ НА ТОНКИХ ПЛЕНКАХ
РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МАГНИТОМЯГКИХ СПЛАВОВ.
ЧАСТЬ II. СВЕРХБЫСТРОЕ ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКОЕ
ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-10-21

Представлен обзор фемтосекундных лазерных технологий магнитооптической записи информации в сплавах на основе редкоземельных (RE) и переходных (TM) металлов. Рассмотрены физические принципы передачи момента импульса от фотонов к электронным спинам ионов в тонких пленках типа RE–TM. Обсуждаются недавно обнаруженные эффекты полностью оптического переключения намагниченности в пленках из сплавов системы Gd–Fe–Co и намечающийся технологический скачок в уменьшении времени записи магнитной информации на несколько порядков величины (вплоть до фемтосекунд, вместо имеющих место в настоящее время наносекунд).

Ключевые слова: фемтосекундный лазер, магнитная анизотропия, редкоземельные магниты, тонкие пленки, магнитный гистерезис.

*V.P. Piskorskiy¹, R.A. Valeev¹, D.V. Korolev¹,
Yu.V. Stolyankov¹, R.B. Morgunov¹*

**TECHNOLOGIES OF MAGNETO-OPTICAL INFORMATION RECORDING
IN THIN FILMS OF RARE-EARTH MAGNETICALLY SOFT ALLOYS.
PART II. ULTRAFAST ALL OPTICAL SWITCHING OF MAGNETIZATION**

A review of femtosecond laser technologies for magneto-optical recording of information in alloys based on rare-earth (RE) and transition (TM) metals is presented. The review discusses the physical principles of momentum transfer from photons to electron spins of ions in thin RE–TM films. The recently discovered effects of the completely optical switching of magnetization in GdFeCo films and the emerging technological leap in shortening the recording time of magnetic information by several orders of magnitude (up to femtoseconds, instead of the nanoseconds taking place today) are discussed.

Keywords: femtosecond laser, magnetic anisotropy, rare-earth magnets, thin films, magnetic hysteresis.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

На смену термическим методам управления намагниченностью, используемым в информационных технологиях, стремительно приходят другие технологии, основанные на воздействии светом, электрическим полем и спиновым током на ферромагнитные наноструктуры в составе элементов памяти. Ряд новых эффектов, обнаруженных в последние годы, позволяет надеяться на увеличение быстродействия магнитной записи сразу на несколько порядков величины. В данной статье обсуждается эффект полностью оптического переключения намагниченности под действием ультракороткого

(фемтосекундного) импульса поляризованного света лазера. Это непростое явление (а точнее, группа явлений) все еще нуждается в проверке и в создании условий для того, чтобы отличить его от тривиальных последствий лазерного облучения (нагрев, абляция, дефектообразование). Однако во всем мире эти исследования реализуются и постепенно выходят на уровень технологических применений.

В данной статье рассмотрены материалы и физические условия, необходимые для оптического переключения намагниченности, а также показано, что этот эффект не является единичным свойством какого-то одного материала, а охватывает широкую группу редкоземельных сплавов, по-разному откликающихся на воздействие лазера.

Свойства сплава системы Gd–Fe–Co

Соединение Gd–Fe–Co – аморфный ферромагнитный сплав, который широко используется в магнитооптической записи [1] и известен своими сильными магнитооптическими эффектами [2]. Сплав обладает вращением Фарадея в 200 раз выше, чем у ортоферритов, в которых наблюдается сильный обратный эффект Фарадея (10 мТл для потока энергии лазера 1 мДж/см²) [3]. Следовательно, в соединении системы Gd–Fe–Co можно ожидать, что индуцированное светом эффективное поле составляет ~2 Тл/мДж/см², что может быть достаточно для перемагничивания. Тонкие пленки этого сплава обычно проявляют сильную перпендикулярную магнитную анизотропию, имеют квадратную петлю гистерезиса и большие магнитные домены, которые легко наблюдаются в поляризационном микроскопе.

Семейство сплавов системы Gd–Fe–Co может широко применяться для сверхбыстрых запоминающих устройств, основанных на оптическом перемагничивании [3, 4], т. е. помимо терромагнитного стандартного перемагничивания допускается использование спин-переориентационных механизмов. В работе [3] показано, что изменение поляризации с правой на левую приводит к смене направления намагниченности в аморфном сплаве системы Gd–Fe–Co. Это выражается в изменении магнитооптического контраста, выявляемого с помощью микроскопа Керра.

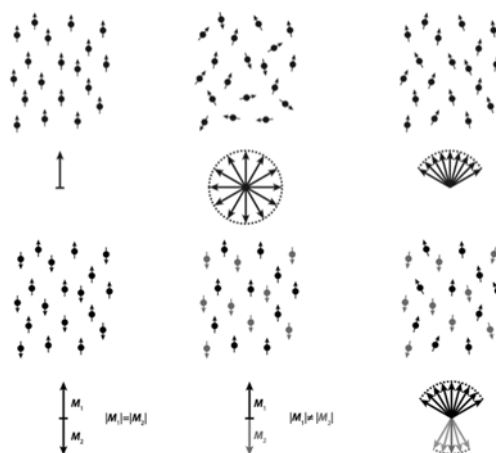


Рис. 1. Схематическое изображение магнитной структуры с одной и двумя магнитными подсистемами [5]

Сплав системы Gd–Fe–Co является аморфным ферромагнетиком, в котором ионы редкоземельной подсистемы и подсистемы переходных металлов занимают случайные позиции (рис. 1). В этих сплавах сосуществуют две магнитные подсистемы, в которых взаимодействия Fe–Co и Gd–Gd носят ферромагнитный характер, а взаимодействие Fe–Gd является антиферромагнитным [5].

Плотность записи и считывания магнитооптических дисков и методы считывания магнитооптической информации

Чем выше плотность записи, тем лучше производительность системы хранения информации. В системах оптической записи процесс считывания ограничивается достижимой плотностью хранения, так как минимальный диаметр сфокусированного лазерного луча определяет минимальный размер меток для считывания. В случае обычных оптических систем размер минимального диаметра луча приблизительно равен длине волны света. Это происходит потому, что термомагнитная запись происходит не во всей области пятна, а только в области, где температура достаточно близко приближается к точке Кюри. Размер записанных меток оценивается с использованием уравнения Хута для данного температурного профиля. Если используется запись модуляции магнитного поля (MFM), метки записываются в соответствии с температурным профилем и напряженностью магнитного поля в процессе охлаждения. На рис. 2 показаны изображения меток, записанных методами LIM (модуляция интенсивности света) и MFM в аморфной пленке соединения системы Tb-Fe-Co с помощью магнитного рентгеновского микроскопа [6].

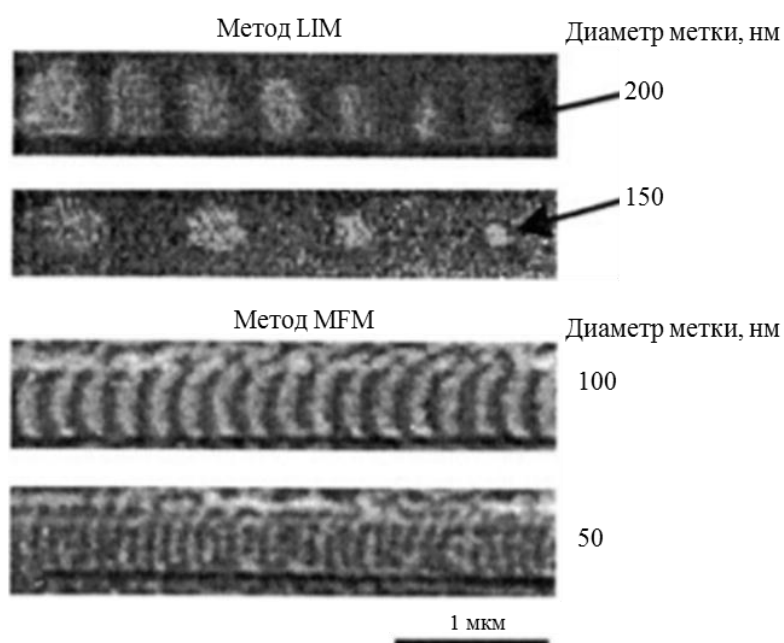


Рис. 2. Изображения меток, записанных методами модуляций интенсивности света (LIM) и магнитного поля (MFM) в аморфных средах соединения системы Tb-Fe-Co, с помощью магнитного рентгеновского микроскопа [6]

Верхний предел плотности записи на самом деле определяется качеством считываемого сигнала. Если размер метки и разделение меток слишком малы, считывающий луч покрывает область, содержащую много соседних меток, как показано в верхней правой части рис. 3, а, и сигнал от отдельных меток не получится выделить.

Для того чтобы преодолеть эту трудность, разработаны методы, которые используются в многослойных магнитных пленках. Многослойные пленки состоят по крайней мере из двух магнитных слоев. Один из них является слоем записи для хранения информации, а другой – слоем считывания для обнаружения информации. Оба слоя связаны друг с другом или обменным взаимодействием, или магнитодипольным взаимодействием (рис. 3).

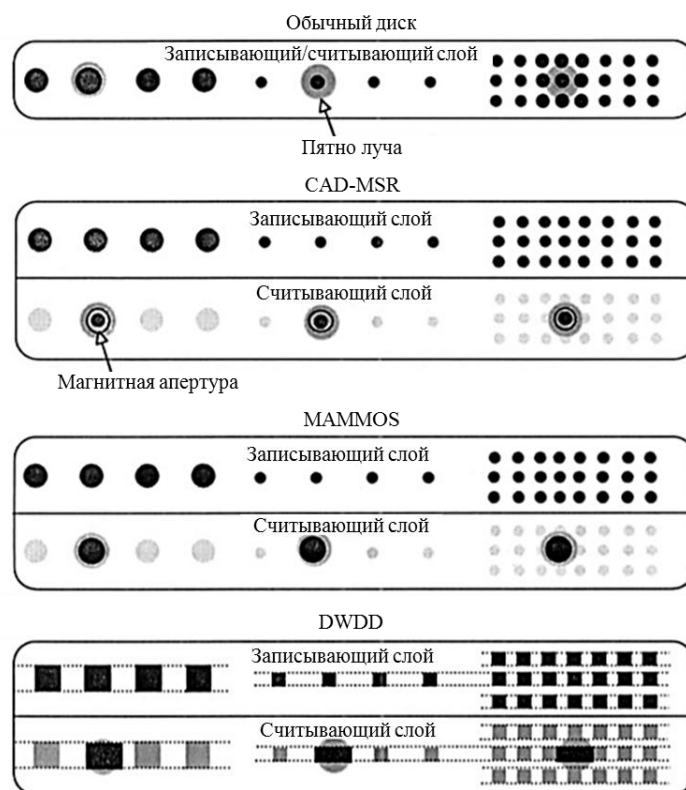


Рис. 3. Методы считывания магнитных меток меньшего размера, чем пятно лазерного луча [5]

Один из методов преодоления указанной проблемы называется магнитным сверхразрешением (MSR) [7], когда только одна метка хранится в слое считывания, а другие метки замаскированы, даже если они находятся внутри луча. Когда слой считывания имеет намагниченность вне плоскости, как показано на рис. 4, считывающий слой действует как апертура, так как его направление намагниченности отражает метку в слое записи из-за силы магнитного дипольного взаимодействия.

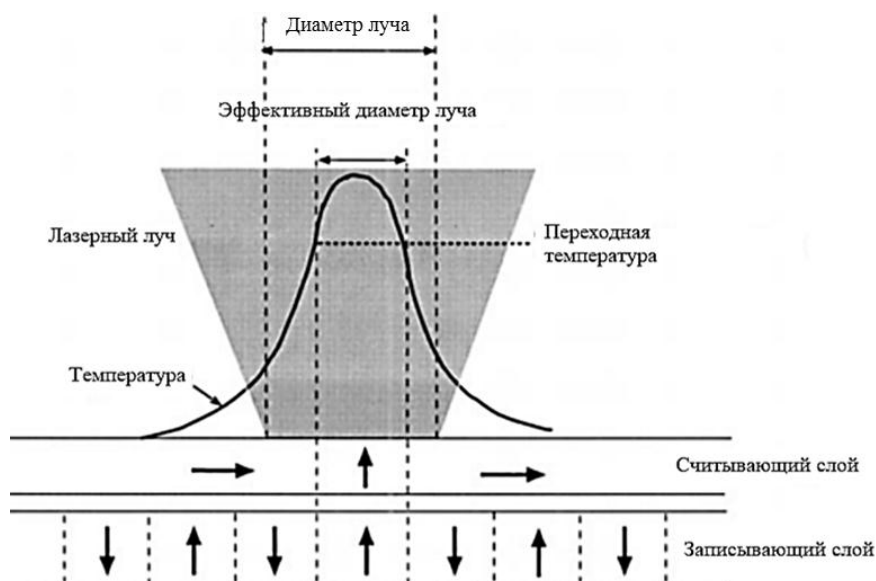


Рис. 4. Схематическое изображение метода магнитного сверхразрешения (MSR) [7], методов магнитного усиления оптической системы (MAMMOS) и смещения доменной стенки обнаружения (DWDD)

Другие методы расширения доменной стенки называются MAMMOS (магнитный усилитель оптической системы) [8] и DWDD (смещение доменной стенки обнаружения) [9]. В этих методах (рис. 3) знак передается на считывающий слой расширения домена, чтобы покрыть все части или большую часть площади пятна лазерного луча, так что величина сигнала сохраняется постоянной, даже когда размер записанной метки намного меньше, чем размер пятна луча.

Трилемма чувствительности, стабильности и малого поля в магнитооптической записи

Устройство магнитной записи должно обладать следующими качествами: 1 – иметь высокую плотность информации и высокое отношение сигнал/шум (чувствительность); 2 – быть стабильным и способным хранить информацию сотни лет; 3 – переключаться малыми магнитными полями, не требующими высоких затрат энергии и делать это локально на малых участках устройства. Эти три одновременных требования к среде магнитной записи кажутся взаимно противоречивыми и не могут быть выполнены одновременно: высокая плотность (чувствительность) требует малого объема элементарной ячейки информации, в то время как стабильность повышается при его увеличении или увеличении магнитной анизотропии. Если не учитывать малый объем информации и пытаться увеличить стабильность за счет роста магнитной анизотропии, то невозможно переключать такой элемент слабым полем, потому что анизотропия увеличивает барьер, разделяющий состояния намагниченности элемента. Поэтому такая ситуация называется трилеммой и до сих пор не нашла своего решения.

Плотность записи будет в конечном итоге ограничена появлением суперпарамагнетизма, когда размер магнитных частиц становится чрезвычайно маленьким и их энергия магнитной анизотропии, пропорциональная их объему, становится сопоставимой с тепловой энергией. Тогда ферромагнитное упорядочение спиновой системы не является больше устойчивым. Фактор, который характеризует стабильность намагниченности тонкой частицы, определяется как

$$N = \frac{K_{\text{и}} V}{kT}, \quad (1)$$

где $K_{\text{и}}$ – постоянная одноосной магнитной анизотропии; V – объем частицы; k – константа Больцмана; T – температура.

Моделирование для продольного магнитного носителя показывает, что величина N должна быть >60 в пригодном устройстве магнитной записи информации [10]. В случае магнитооптической записи носители представляют собой сплошные пленки, в которых происходит обмен информацией друг с другом на протяжении всей записи. Таким образом, ситуация немного отличается от обычной магнитной записи на носитель. Необходимо также учитывать влияние доменной стенки вокруг доменов, когда учитывается как влияние энергии стенки, так и тепловое возбуждение при равномерной прецессии домена намагниченности, а коэффициент термостабильности, определяемый по уравнению (1), будет изменен на

$$N = \frac{\left(K_{\text{и}} - \frac{\sigma_w}{2r} \right)}{kT}, \quad (2)$$

где σ_w – плотность энергии доменной стенки; r – радиус области перемагничивания.

Помимо появления суперпарамагнетизма, минимальный размер метки определяется стабильностью домена. При введении феноменологического параметра –

коэрцитивная сила H_c , устойчивость цилиндрического домена описывается уравнением Хута (см. уравнение (1) в части I [11]). Когда температура носителя является равномерной, второй член уравнения Хута пренебрежимо мал, и если третьим слагаемым (размагничивающим полем) также пренебречь, то минимальный радиус домена определяется первым слагаемым и коэрцитивной силой – $r_{\min} = \sigma_w / 2M_s H_c$ (где M_s – спонтанная намагниченность). Если радиус домена меньше, чем r_{\min} , домен разрушится из-за энергии стенки, которая действует как поверхностная энергия домена. Коэрцитивность трудно определить теоретически для практических материалов, но если просто применить однодоменную теорию (где $H_c = 2K_w / M_s$) и рассмотреть соотношение $\sigma_w = 4(AK_i)^{1/2}$, то минимальная область радиуса становится равна

$$r_{\min} = \left(\frac{A}{K_i} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где A – константа обменного взаимодействия.

Помимо вышеизложенного, необходимо учитывать ширину доменной стенки. В данном случае ширина не была учтена, но предполагалось, что стенка бесконечно тонкая. Минимальный диаметр домена будет почти в 2 раза больше с учетом ширины 180-градусной стенки:

$$\delta_w = \pi \left(\frac{A}{K_i} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Для записи с высокой плотностью информации очень важно, где и как доменные стенки закреплены. Если плотность закрепления очень мала, то доменная стенка или магнитные области не могут сохранять свою форму в соответствии с такими условиями, как в уравнении Хута, но они могут сформировать устойчивую форму путем распределения точек закрепления.

Влияние окисления после лазерного облучения тонких пленок на запись и хранение информации

Лазерное облучение стимулирует активацию химических реакций на поверхности пленки и в приповерхностном прогревом слое. Одной из термохимических реакций, наиболее часто встречающихся на практике, является окисление. Процесс окисления начинается с адсорбции, а затем хемосорбции кислорода из воздуха, в результате которой образуется оксидная пленка толщиной несколько нанометров. Дальнейший рост оксидного слоя связан с электрическими процессами, сущность которых заключается в прохождении туннельным способом электронов из металла через оксид к кислороду. В результате создается электрическое поле, ускоряющее диффузию катионов металла через оксидную пленку на поверхность, где они соединяются с кислородом, наращивая оксидный слой. Такой механизм окисления продолжается до такой толщины слоя, при которой туннельный эффект исчезает.

Действие лазерного излучения приводит к появлению дополнительного электрического поля световой волны с одной стороны, а с другой – к чисто термическому эффекту стимулирования реакции окисления за счет процессов концентрационной диффузии атомов металла и кислорода через слой растущего оксида.

Поскольку реакция окисления, впрочем как и другие термохимические твердотельные реакции, является активируемой (т. е. их скорость растет по закону $\sim e^{-E/kT}$, где E – энергия активации процесса), то она интенсивно протекает при повышенных температурах, все еще далеких от температур, способных вызвать разрушение пленки или

подложки. При очень малых плотностях светового потока не наблюдается заметного окисления, что связано с малой температурой нагрева (~200 °С). При переходе к очень коротким импульсам эффективность окисления мала, так как недостаточно времени для протекания диффузионных и других процессов, необходимых для окисления.

Обычно после ионной имплантации с дозой облучения до 10^{14} ионов/см² пленочные структуры на полупроводниковых кристаллах и сами кристаллы становятся аморфными и теряют свою электрическую активность, что делает их непригодными к применению. Ранее такие аномалии устранялись путем длительных термических отжигов при 1000 °С в вакууме или в нейтральной среде. Такие параметры отжига приводили к диффузии примесей в соседние слои, в результате чего размывались границы слоев, разрушались гетероструктуры. Лазерный отжиг позволил довести продолжительность термической обработки до 10^{-8} с и ограничить место воздействия только малой областью обработки. Преимущества лазерного импульсного отжига заключаются в отсутствии диффузии примесей в соседние слои и слоев друг в друга. Однако следует учитывать, что увеличение длительности импульса до 10^{-3} с уже не дает никаких преимуществ по сравнению с термическим отжигом. При лазерном отжиге концентрация носителей заряда, как правило, выше концентрации, которая обеспечивается термическим отжигом.

В процессе магнитооптической записи помимо лазерного отжига, возникает холодная абляция – процесс удаления вещества с поверхности путем испарения в холодной плазме. При этом не происходит разогрева поверхности, достаточного для плавления или разрушения материала. Низкая мощность лазера при холодной абляции обеспечивает испарение атомов, попавших в область холодной (темной) плазмы. Лишь при плотности лазерного излучения, превышающей некоторый порог, чувствительный к типу материала, происходит образование кратера, сопровождающееся расплавлением образца и появлением горячей (светящейся) плазмы.

Полностью оптическое переключение намагниченности

Сплавы на основе редкоземельных (RE) и переходных (TM) металлов нашли новое применение в сверхплотной магнитооптической записи, основанной не на тепловых эффектах, а на сверхбыстром полностью оптическом переключении намагниченности (All Optical Switching – AOS) [12]. Полностью оптическая запись информации возможна при использовании фемтосекундного лазерного импульса (рис. 5, а). Полностью оптическое перемагничивание тонких ферритмагнитных пленок достигнуто облучением образца циркулярно-поляризованным лазерным светом. Белые и черные области на рис. 5, а соответствуют намагниченности пленки, направленной «вверх» и «вниз» соответственно [13, 14]. Локально лазерный импульс сначала поглощается электронной подсистемой, затем тепло передается между спиновым и атомным тепловыми резервуарами. Условием полностью оптического переключения намагниченности является определенное соотношение между длительностью лазерного импульса τ и временами передачи энергии между электронной, спиновой и атомной подсистемами. Другими словами, за время действия лазерного импульса спиновая подсистема должна успевать перейти в возбужденное (намагниченное) состояние, а атомная и электронная подсистемы не должны успеть нагреться. Таким образом, можно наблюдать изменение намагниченности (т. е. переключение направления локальной намагниченности пленки на 180 градусов) в стабильное и противоположно намагниченное состояние под действием лазерного облучения (рис. 5, в).

Ферритмагнетики характеризуются эффективным магнитным моментом, который вычисляется не сложением, а вычитанием спинов подрешеток. При определенных

температурах ферромагнетики демонстрируют компенсацию магнитного момента этих подрешеток, т. е. в магнитоупорядоченном состоянии магнитный момент ферромагнитного образца может оказаться равным нулю. Такие температуры называются точками компенсации (их может быть несколько), а сами ферромагнетики называют *N*-типом, так как зависимость $M(T)$ похожа на букву *N*.

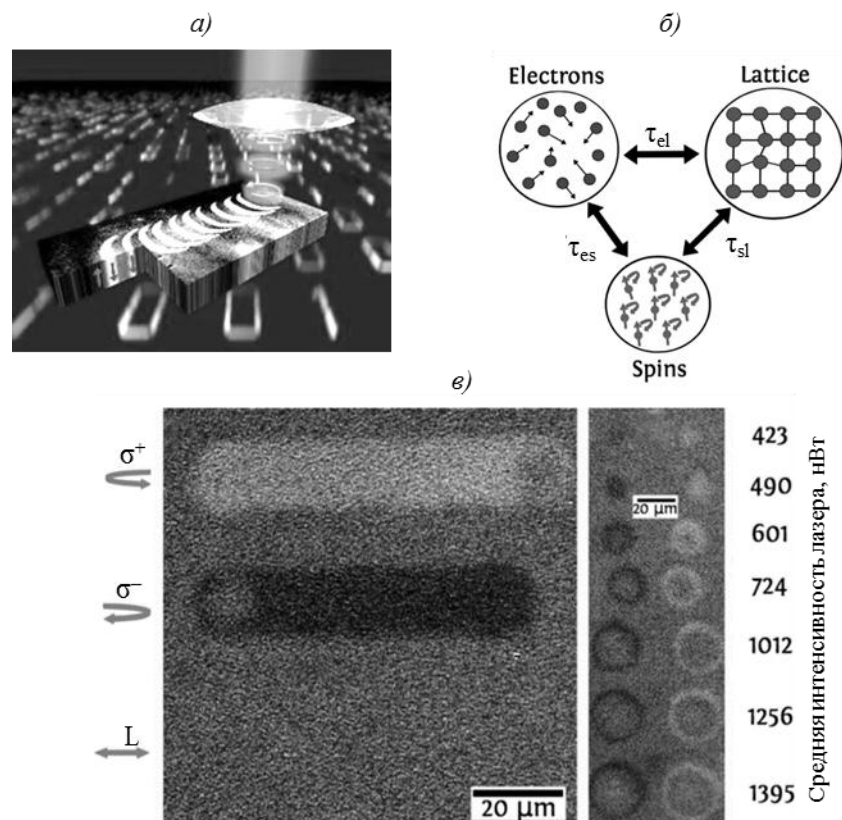


Рис. 5. Полностью оптическая запись информации фемтосекундными лазерными импульсами [4] (а); взаимодействующие системы (спиновая, электронная и атомная) [13] (б); магнитооптический отклик ферромагнитной структуры системы Gd–Fe–Co (в) [5]; σ^+ , σ^- – право- и левополяризованный свет соответственно; L – неполяризованный свет

Не следует представлять положение дел в описанной области таким образом, что никаких проблем с полностью оптической записью информации не существует. Авторами данной статьи произведены попытки исследовать остаточные изменения в пленках под действием фемтосекундного лазера той мощности, которая обычно используется для наблюдения эффекта флюенса с потоком энергии 10–20 мДж/см². С помощью атомного силового микроскопа наблюдается отчетливый остаточный рельеф, созданный лазером (рис. 6). Очевидно, что облучение оставляет ямку глубиной 10–20 нм, которую невозможно обнаружить с помощью оптического микроскопа или с помощью микроскопии Керра. Поэтому авторы многих работ утверждают, что полностью оптическое переключение намагниченности не сопровождается остаточными изменениями в пленке, и считают, что можно производить бесконечное количество циклов «запись–считывание». На рис. 6 показано, что ямка нанометровой глубины, не обнаруживаемая с помощью микроскопии Керра, все же существует и, очевидно, углубляется по мере повторения облучения. В итоге полезное вещество может полностью испариться из рабочей зоны. Те исследователи, с которыми авторы данной статьи обсуждали эту ситуацию,

признают существование проблемы конечного числа циклов AOS, однако, кроме работы авторов данной статьи по обнаружению ямки, в научно-технической литературе не описана ни одна попытка повторить это измерение, сделав контрольный опыт с помощью атомного силового микроскопа.

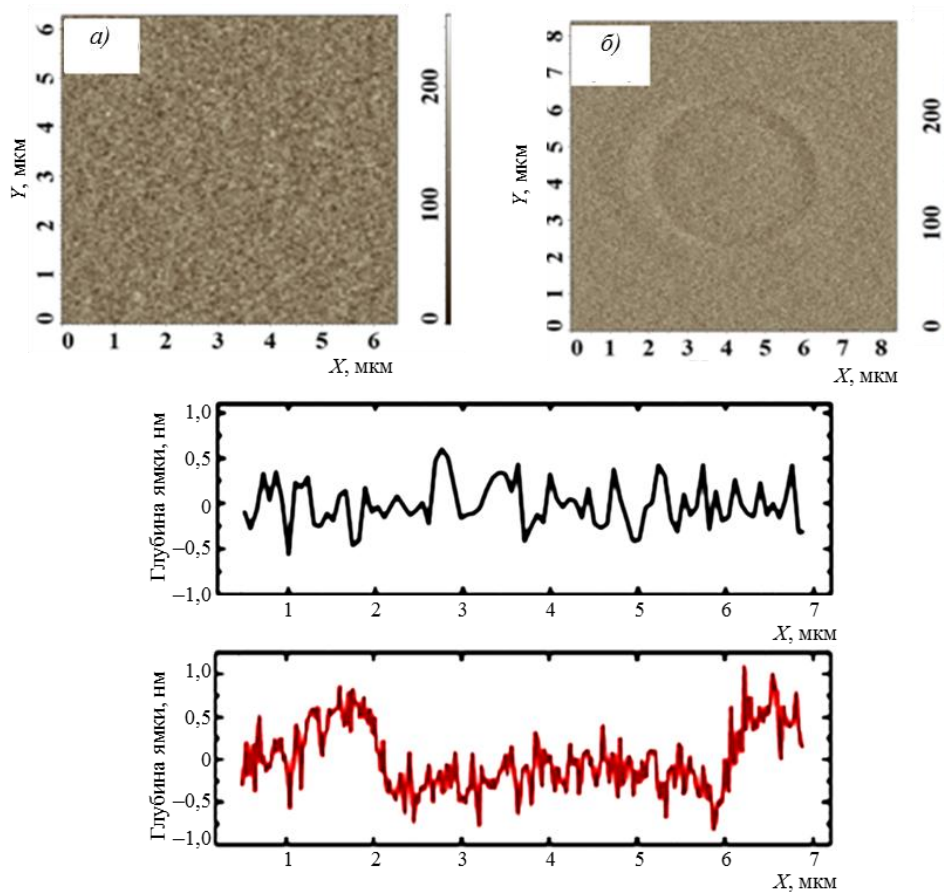


Рис. 6. Рельеф поверхности пленки сплава системы Gd–Fe–Co, полученный после облучения импульсом лазера длительностью 50 фемтосекунд и флюэнсом потока энергии 20 мДж/см² с помощью атомного (а) и магнитного (б) силового микроскопа (внизу представлены профили полученной ямки)

Вышеприведенный спин-поляризационный механизм переключения намагниченности обладает очень высокими характеристиками скорости и превышает лазерную термомагнитную технологию по этому параметру на 5–6 порядков величины. Однако при его реализации имеется множество проблем, на преодоление которых направлены усилия мирового научного сообщества. Перечислим некоторые из проблем:

- низкая плотность записи, связанная с ограничением размера минимально возможного участка засвеченной поверхности, который не может быть намного меньше, чем длина волны света ~1 мкм;

- холодная абляция, которая существует при любых сколь угодно малых мощностях лазера и приводит к формированию ямок глубиной 10–20 нм, углубляющихся по мере приложения серий импульсов и в конечном итоге разрастающихся по глубине до неприемлемых значений, препятствующих длительному использованию пленки;

- низкая стабильность намагниченности участков, созданной лазером. Лазер перемагничивает участок пленки вблизи точек компенсации магнитных моментов

подрешеток ферромагнетика, когда его магнитная анизотропия минимальна. Это облегчает перемагничивание, но сильно ослабляет стабильность устройства записи информации в полном соответствии с упомянутой ранее трилеммой устройств магнитной записи;

– быстро протекающие химические реакции, инициированные лазером на поверхности пленки и приводящие к необратимым изменениям свойств магнитной среды.

Все эти проблемы препятствуют быстрому внедрению недавно открытого эффекта полностью оптического переключения намагниченности в промышленность для его использования в системах магнитной записи. Однако, несмотря на перечисленные ранее проблемы, эффект полностью оптического переключения намагниченности, описанный в многочисленных научных работах, является значительным шагом вперед по сравнению с технологией термического перемагничивания светом [15–25].

Заключения

Широкое разнообразие термомагнитных свойств тонких пленок типа RE–TM привело к дальнейшим разработкам многослойных пленок. Конечный предел плотности записи при использовании магнитных пленок пока не ясен, но возможность уплотнения записи термомагнитных меток соответствует по размеру нескольким десяткам нанометров. Для того чтобы считывать такие маленькие записанные метки, необходимо развивать новые методы считывания, а также разрабатывать материалы, подходящие для записи с высокой плотностью цифровой информации.

В магнитооптической записи широко используются сплавы систем Gd–Fe–Co и Tb–Fe–Co, у которых проявляется существенный магнитооптический эффект. Аморфные пленки этих сплавов обладают сильной перпендикулярной магнитной анизотропией, квадратной петлей гистерезиса и большими магнитными доменами. Сплав системы Gd–Fe–Co можно применять для сверхбыстрых запоминающих устройств, основанных на полностью оптическом перемагничивании.

Использование лазерного фемтосекундного облучения магнитооптических тонких пленок позволяет настолько быстро записать информацию, что процесс окисления на поверхности диска не возникает, так как температура на ней не меняется, что, в свою очередь, позволяет увеличить продолжительность использования дисков.

Однако при более длительных лазерных экспозициях можно ожидать протекания различных химических реакций, в том числе, стимулированных нагревом, механическими напряжениями в ямке или взаимодействием света со спинами атомов. Такими реакциями могут быть окисление, образование эвтектики и микровключений CoPt, образование тонкого слоя Gd₂O₃ поверх сплава, которые приводят к потере магнитных моментов Gd, а также образование соединений с термически окисленной подложкой Si/SiO₂, таких как MgSiO₃, SiO₃+Mg, Mg₂SiO₄. Эти процессы должны в дальнейшем детально исследоваться для развития описанных в данной статье технологий хранения и обработки цифровой информации.

Отметим, что во ФГУП «ВИАМ» хорошо развита научно-инженерная школа по созданию и анализу редкоземельных магнитов [26–30], имеются обширные возможности для напыления тонких пленок, их анализа и развития отечественной инженерии носителей магнитной информации.

Библиографический список

1. Awano H., Ohnuki S., Shirai H. et al. Magnetic domain expansion readout for amplification of an ultra high density magneto-optical recording signal // Applied Physics Letters. 1996. Vol. 69 (27). P. 4257–4259. DOI: 10.1063/1.116963.

2. Hansen P., Clausen C., Much G. et al. Magnetic and magneto-optical properties of rare-earth transition-metal alloys containing Gd, Tb, Fe, Co // *Journal of Applied Physics*. 1989. Vol. 66 (2). P. 756–767. DOI: 10.1063/1.343551.
3. Kimel A.V., Kirilyuk A., Usachev P.A. et al. Ultrafast non-thermal control of magnetization by instantaneous photomagnetic pulses // *Nature*. 2005. Vol. 435 (7042). P. 655–657. DOI: 10.1038/nature03564.
4. Stanciu C.D., Hansteen F., Kimel A.V. et al. All-Optical Magnetic Recording with Circularly Polarized Light // *Physical Review Letters*. 2007. Vol. 99 (4). P. 047601. DOI: 10.1103/physrevlett.99.047601.
5. Mangin S., Gottwald M., Lambert C.-H. et al. Engineered materials for all-optical helicity-dependent magnetic switching // *Nature Materials*. 2014. Vol. 13 (3). P. 286–292. DOI: 10.1038/nmat3864.
6. Becker J.J. Ultrafast Laser Induced Magnetization Dynamics in High Magnetic Fields: thesis, PhD. Enschede, 2016. 127 p. URL: <http://repository.uibn.ru.nl> (дата обращения: 03.09.2019).
7. Fischer P., Eimüller T., Glück S. et al. High Resolution Imaging of Magnetic Domains with Magnetic Soft X-ray Microscopy // *Journal of the Magnetics Society of Japan*. 2001. Vol. 25 (3-2). P. 186–191. DOI: 10.3379/jmsjmag.25.186.
8. Aratani K., Fukumoto A., Ohta M. et al. Magnetically induced super resolution in a novel magneto-optical disk // *Optical Data Storage Topical Meeting*. Colorado: Springs, 1991. Vol. 1499. P. 209. DOI: 10.1117/12.45903.
9. Takahashi A., Nakajima J., Murakami Y. et al. Improvement of readout resolution with an in-plane magnetization film for a magneto-optical disk // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1994. Vol. 30 (2). P. 232–236. DOI: 10.1109/20.312263.
10. Shiratori T., Fujii E., Miyaoka Y., Hozumi Y. High-density magneto-optical recording with domain wall displacement detection // *Journal of the Magnetics Society of Japan*. 1998. Vol. 22 (S_2_MORIS_97). P. 47–50. DOI: 10.3379/jmsjmag.22.s2_47.
11. Пискорский В.П., Валеов Р.А., Королев Д.В., Столянков Ю.В., Моргунов Р.Б. Технологии магнитооптической записи информации на тонких пленках редкоземельных магнетомягких сплавов. Часть I. Термооптическая запись информации // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2020. №1 (85). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-24-37.
12. Charap S.H., Pu-Ling Lu, Yanjun He. Thermal stability of recorded information at high densities // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1997. Vol. 33 (1). P. 978–983. DOI: 10.1109/20.560142.
13. Hadri E.M.S. Magnetization reversal mechanism leading to all-optical helicity-dependent switching: thesis, PhD. Nancy: Université de Lorraine, 2016. 145 p. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr> (дата обращения: 05.09.2019).
14. Chen D., Ready J.F., Bernal G.E. MnBi Thin Films: Physical Properties and Memory Applications // *Journal of Applied Physics*. 1968. Vol. 39 (8). P. 3916–3927. DOI: 10.1063/1.1656875.
15. Williams H.J., Sherwood R.C., Foster F.G., Kelley E.M. Magnetic Writing on Thin Films of MnBi // *Journal of Applied Physics*. 1957. Vol. 28 (10). P. 1181–1184. DOI: 10.1063/1.1722603.
16. Huth B.G. Calculations of Stable Domain Radii Produced by Thermomagnetic Writing // *IBM Journal of Research and Development*. 1974. Vol. 18 (2). P. 100–109. DOI: 10.1147/rd.182.0100.
17. Mansuripur M. *The Physical Principles of Magneto-optical Recording*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 776 p. DOI: 10.1017/CBO9780511622472.
18. Beaurepaire E., Merle J.-C., Daunois A., Bigot J.-Y. Ultrafast Spin Dynamics in Ferromagnetic Nickel // *Physical Review Letters*. 1996. Vol. 76 (22). P. 4250–4253. DOI: 10.1103/physrevlett.76.4250.
19. Egashira K., Yamada T. Kerr-effect enhancement and improvement of readout characteristics in MnBi film memory // *Journal of Applied Physics*. 1974. Vol. 45 (8). P. 3643–3648. DOI: 10.1063/1.1663831.
20. Mansfield S.M., Kino G.S. Solid immersion microscope // *Applied Physics Letters*. 1990. Vol. 57 (24). P. 2615–2616. DOI: 10.1063/1.103828.

21. Mansfield S.M., Studenmund W.R., Kino G.S., Osato K. High-numerical-aperture lens system for optical storage // *Optics Letters*. 1993. Vol. 18 (4). P. 305. DOI: 10.1364/ol.18.000305.
22. Terris B.D., Mamin H.J., Rugar D., Studenmund W.R., Kino G.S. Near-field optical data storage using a solid immersion lens // *Applied Physics Letters*. 1994. Vol. 65 (4). P. 388–390. DOI: 10.1063/1.112341.
23. Katayama H., Sawamura S., Ogimoto Y. et al. New Magnetic Recording Method Using Laser Assisted Read/Write Technologies // *Journal of the Magnetism Society of Japan*. 1999. Vol. 23 (S_1_MORIS_99). P. 233–236. DOI: 10.3379/jmsjmag.23.s1_233.
24. Nemoto H., Saga H., Sukeda H., Takahashi M. High Density Thermomagnetic Recording on Flux Detectable RE–TM Media // *Journal of the Magnetism Society of Japan*. 1999. Vol. 23 (S_1_MORIS_99). P. 229–232. DOI: 10.3379/jmsjmag.23.s1_229.
25. Takahashi M., Niihara T., Ohta N. Study on recorded domain characteristics of magneto-optical TbFeCo disks // *Journal of Applied Physics*. 1988. Vol. 64 (1). P. 262–269. DOI: 10.1063/1.341419.
26. Каблов Е.Н., Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Валеев Р.А., Моисеева Н.С., Степанова С.В., Петраков А.Ф., Терешина И.С., Репина М.В. Термостабильные кольцевые магниты с радиальной текстурой на основе Nd(Pr)–Dy–Fe–Co–B // *Физика и химия обработки материалов*. 2011. Т. 3. С. 43–47. URL: viam.ru/public/files/2011/2011-205746.pdf (дата обращения: 18.09.2019).
27. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Резчикова И.И., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Зависимость свойств спеченных материалов системы Nd–Dy–Fe–Co–B от технологических параметров // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S2 (39). С. 24–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-24-29.
28. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Резчикова И.И. Механизмы влияния содержания бора и термообработки на свойства магнитов системы Nd–Fe–Al–Ti–B // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S2 (39). С. 30–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-30-34.
29. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
30. Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В., Моргунов Р.Б., Резчикова И.И. Влияние легирования тербием и гадолинием на термостабильность и магнитные свойства спеченных материалов Pr–Tb–Gd–Fe–Co–B // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2019. №7 (79). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-59-66.