

## Современное состояние исследований в спинтронике и магнонике

Д.В. Калябин<sup>1</sup>, С.А. Никитов<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, ул. Моховая 11к7, г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Институтский пер. 9, г. Долгопрудный, Российская Федерация

<sup>3</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012, ул. Астраханская 83, г. Саратов, Российская Федерация

E-mail: \* [nikitov@cplire.ru](mailto:nikitov@cplire.ru)

*Представлен обзор современного состояния исследований в области спинтронике и магноники. Рассмотрены основные концепции создания устройств на принципах магнонной логики, а также некоторые эффекты, необходимые для генерации и детектирования магнонных сигналов. Особое внимание уделено возможностям управления магнитной подсистемой с помощью спиновых и электрических токов, механического напряжения, а также повышению рабочих диапазонов частот. Обсуждаются некоторые конкретные реализованные на данный момент компоненты и пути их дальнейшего развития.*

*Ключевые слова: спинтроника, магноника, спиновые волны, магноны, спиновый ток, ферромагнетики, антиферромагнетики, волноводы, наноструктуры, осцилляторы*

## Current state of research in spintronics and magnonics

Dmitry Kalyabin<sup>1</sup>, Sergey Nikitov<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup> Kotelnikov IRE RAS, 125009, 11-7 Mokhovaya, Moscow, Russia

<sup>2</sup> MIPT, 141701, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Russia

<sup>3</sup> Saratov State University, 410012, 83 Astrakhanskaya Street, Saratov, Russia

*An overview of the current state of research in the field of spintronics and magnonics is presented. The basic concepts of creating devices based on the principles of magnonic logic are considered, as well as some of the effects required for the generation and detection of magnon signals. Particular attention is paid to the possibilities of controlling the magnetic subsystem by means of spin and electric currents, mechanical strain, as well as increasing the operating frequency ranges. Some specific components implemented so far and the ways of their further development are discussed.*

*Keywords: spintronics, magnonics, spin waves, magnons, spin current, ferromagnets, antiferromagnets, waveguides, nanostructures, oscillators*

### 1. Введение

Магноника — область электроники, изучающая возбуждение, распространение и детектирование спиновых волн (квантами которых являются магноны) в различных магнитных гетероструктурах [1-4]. Широкое многообразие линейных и нелинейных спинволновых явлений, возникающих в таких структурах, а также гигагерцовые частотные диапазоны, привлекли существенный интерес к этой области и обеспечили множество практических приложений в телекоммуникационных системах. На современном уровне развития области, спиновые волны рассматриваются в качестве потенциальных носителей информации, поскольку они обладают нанометровыми длинами волн и могут существовать даже и в субтерагерцовых частотах, а также могут передавать спиновую информацию на макроскопические расстояния без джоулевых

потерь. Эти фундаментальные отличия магنونных логических схем от привычных электронных интегральных схем со CMOS-схемотехникой и продемонстрированная возможность их изготовления и на стандартных полупроводниковых подложках предоставляют новые возможности для существенного усовершенствования таких параметров, как энергоэффективность, быстродействие и плотность записи информации.

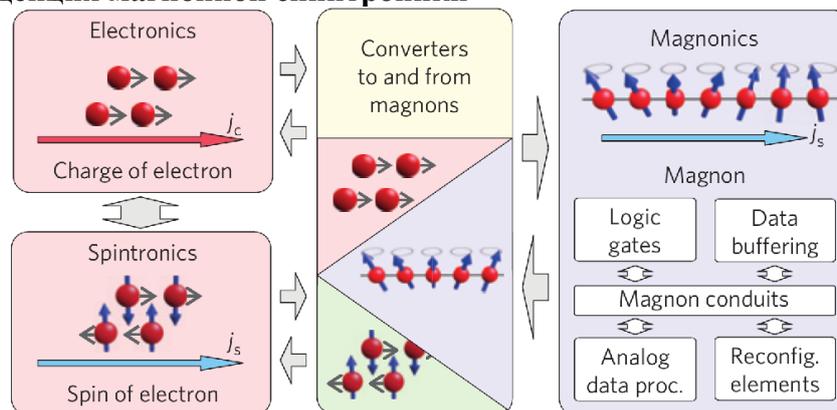
Данный обзор не может претендовать на хотя бы поверхностное описание всех основных направлений из области магنونики. Поэтому мы остановимся лишь на некоторых направлениях. Раздел 2 продемонстрирует концепцию магنونного подхода к обработке информации [1], в рамках которого возможно преобразование электрических сигналов в магنونные, их передача и обработка, и обратное преобразование. Использование магнитных волноводов, обеспечивающих распространение спиновых волн, позволяет создавать схемы из множества магنونных вентилях, обеспечивая параллельную обработку информации [5]. Более того возможно расширение планарной геометрии на многослойные структуры [6].

Другой возможностью улучшить характеристики существующих магنونных устройств является использование эффектов, связанных с взаимосвязью магнитной и упругой подсистем, и возникшей на ее основе — стрейнтроники [7]. Благодаря этому возможно более быстрое и энергоэффективное переключение магнитной подсистемы с помощью электрических токов, возбуждение спиновых волн стандартными методами акустоэлектроники, создание новых типов памяти. Некоторые из этих результатов описаны в третьем разделе.

Использование различных магнитных материалов позволяет получать магنونные волноводы и осцилляторы со значительно различающимися характеристиками. Так, например, в разделе 4 описано применение антиферромагнитных материалов для возбуждения обменно-усиленной магнитной динамики на частотах от долей до нескольких десятков терагерц [8].

## 2. Магنونный подход к обработке и передаче информации

### 2.1. Концепция магنونной спинтроники



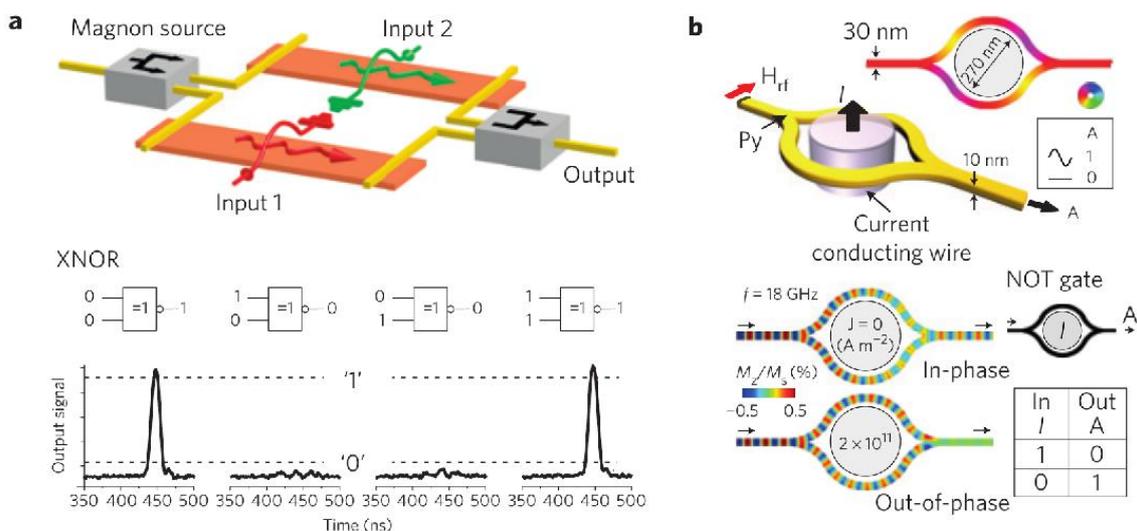
**Рис. 1. Концепция магنونной спинтроники [1]. Информация закодированная зарядовыми и спиновыми токами преобразуется в ток магнов, обрабатывается в магنونных логических устройствах и преобразуется обратно**

На рис. 1 представлена концептуальная схема реализации элементов магنونной логики и их интеграция с устройствами электроники. Носителем информации выступает спиновая волна (либо амплитуда, либо фаза), свойства которой определяется двумя основными взаимодействиями микроскопических магнитных моментов — короткодействующее обменное взаимодействие соседних спинов (играет роль на

длинах волн порядка десятков и сотен нанометров) и дальнедействующее дипольное взаимодействие одного магнитного момента со множеством соседей. Исторически основное внимание уделялось дипольным спиновым волнам или же магнитоэлектрическим спиновым волнам, так как они довольно эффективно возбуждаются индуктивными антеннами [9]. В настоящее же время, в связи с необходимостью миниатюризации структур, большее внимание уделяется обменным спиновым волнам, позволяющим передавать сигналы по нанометровым волноводам [10].

Перенос магнитного момента с помощью магнонов спиновых волн, в отличие от более привычного спин-поляризованного электрического тока, обладает тем преимуществом, что не вызывает движение электронов, а значит и джоулевых потерь [11]. Одним из самых перспективных магнитных диэлектриков является железиттриевый гранат [12], обладающий рекордно низкими потерями. В нем магноны могут преодолевать макроскопические расстояния вплоть до нескольких сантиметров [13]. На рис. 2 показаны магнонные волноводы, образующие интерферометры типа Маха-Цендера. Управляя свойствами спиновых волн, распространяющихся в разных плечах этих волноводов, мы можем менять разность фаз сигналов на выходе, что приводит к интерференции сигналов. Пришедшие в противофазе сигналы считаются нулем, в фазе — единицей. На рис. 2a – показан вентиль XNOR [14], а на Рис. 2b – NOT [15].

Классическим подходом к возбуждению спиновых волн является индуктивные СВЧ методики, в рамках которых электрический сигнал подается на микрополосковую антенну, создающую вокруг себя электромагнитное поле на частотах, совпадающих с собственными частотами магнитной пленки, что возбуждает под антенной спиновую волну, распространяющуюся вдоль волновода. Однако, множество работ в последнее время посвящено другим методикам, связанным с эффектами переноса. Так, показано [16], что эффект переноса спинового момента, возникающий при инжекции поляризованного по спину электрического тока в проводящий магнетик, может приводить к перемагничиванию или возбуждению магнитной динамики в узкой области вблизи наноконтакта. Для поляризации электрического тока его нужно пропустить через дополнительный слой с зафиксированной намагниченностью.



**Рис. 2. Магнонные логические элементы на основе а) микро- и б) наноразмерных интерферометров Маха-Цендера. Управление электрическим током обеспечивает различные волноведущие свойства разных плечей интерферометра и приводит к управлению сдвигом фаз сигналов. [1]**

Другим способом создания поляризованного тока является использование спинового эффекта Холла при спин-зависимом рассеянии электронов в немагнитном тяжелом металле с сильным спинорбитальным взаимодействием. В этом случае, электроны движущиеся в тонком слое такого металла (часто это платина), рассеиваются асимметрично, что создает спиновый ток перпендикулярно поверхности пленки. И если на границе слоя тяжелого металла расположить магнитный слой, то в нем будет возможно компенсировать потери при прецессии намагниченности или даже вызвать автогенерацию [17].

Рассматриваемая идеология обработки сигналов (см. рис. 1) подразумевает, что информация потом будет необходимо обратно преобразовать в электрические сигналы. Это можно сделать с помощью таких же микрополосковых антенн, в которых вихревое магнитное поле, возбуждаемое бегущими в магнитной пленке спиновыми волнами, будет вызывать электрический СВЧ сигнал. А во втором подходе, связанном с эффектами переноса, благодаря обратному спиновому эффекту Холла, спиновый ток в слое платины, вызванный спиновой накачкой от интерфейса платина/магнитная пленка, создает ток проводимости, параллельный поверхности пленок. Это наведенное напряжение можно детектировать и, таким образом, выявить наличие магнетонных возбуждений [18].

## 2.2. Массивы магнетонных наноструктур для устройств памяти и нейроморфных вычислений.

Магнетонные устройства могут быть использованы не только для обработки информации, но и для ее хранения. Одним из наиболее простых для реализации является использование магнитных туннельных переходов [19]. На рис. 3 представлен такой переход, состоящий из двух ферромагнитных слоев, разделенных изолятором. Намагниченность одного из слоев зафиксирована, а намагниченность другого параллельна или антипараллельна ей. В зависимости от этого существенно образом будет меняться туннельное сопротивление такой структуры, благодаря чему можно считать 0 или 1, хранящиеся в «свободном слое». Прикладывая же достаточно большой ток можно перемагнитить свободный слой, то есть перезаписать информацию в ячейку. Использование такого подхода позволяет добиться энергонезависимости памяти, высокой скорости операций и хорошей масштабируемости.

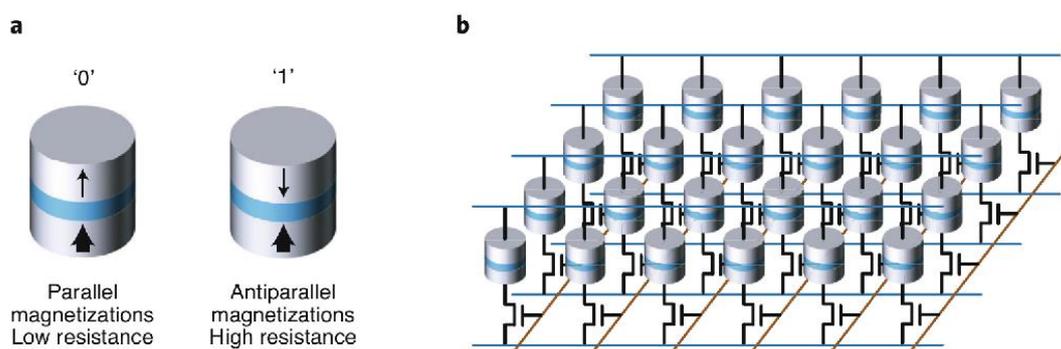


Рис. 3. Реализация памяти на магнитных туннельных переходах, состоящих из двух ферромагнитных слоев, разделенных изолятором [19].

Логичным развитием направления магнетонных логических устройств являлось исследование возможности объединения множества единичных элементов в двумерные массивы для повышения объема информации, обрабатываемого в единицу времени. Так были получены некоторые прототипы устройств параллельной обработки сигналов

[5]. В этой работе (см. рис. 4) рассматривались магнитоэлектрические ячейки, состоящие из пьезоэлектрика и ферромагнетика, управляемые металлическим затвором и расположенные на общей магнотной шине.

В этих ячейках ориентация намагниченности также кодирует информацию, однако, управление осуществляется с помощью более сложного механизма. Электрическое напряжение на металлическом затворе создает электрическое поле, поляризующее пьезоэлектрическую прослойку, которая в свою очередь деформируется и растягивает ферромагнитный слой. За счет магнитоупругого взаимодействия анизотропия ферромагнитного слоя меняется и существенным образом понижается порог переключения. То есть ячейка теперь может взаимодействовать со своими соседями посредством общей шины. Более подробно о магнитоупругости расскажем в Разделе 3. Теперь у нас в магнитных ячейках не только хранится информация, но и обрабатывается с помощью взаимодействия с соседними ячейками.

Более замысловатыми являются такие магнотные структуры, поведение которых в ответ на внешнее воздействие является чем-то схожим с нейронами и синапсами. Эта новая область поэтому называется нейроморфной спинтроникой [19]. Она позволяет создавать логические схемы, обладающие разнообразными свойствами: перестраиваемость (подобно нейропластичности мозга); энергонезависимость; осцилляторное и стохастическое поведение. После обработки или сохранения сигнала, он дальше может быть передан с помощью спиновых или электрических токов, спиновых волн. Идея работы таких устройств показана на рис. 5.

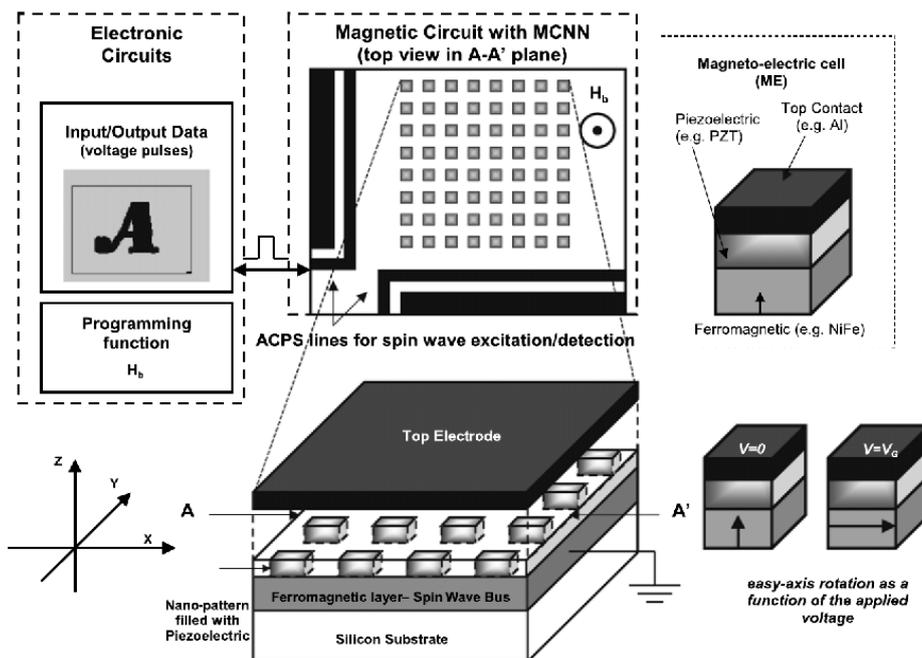
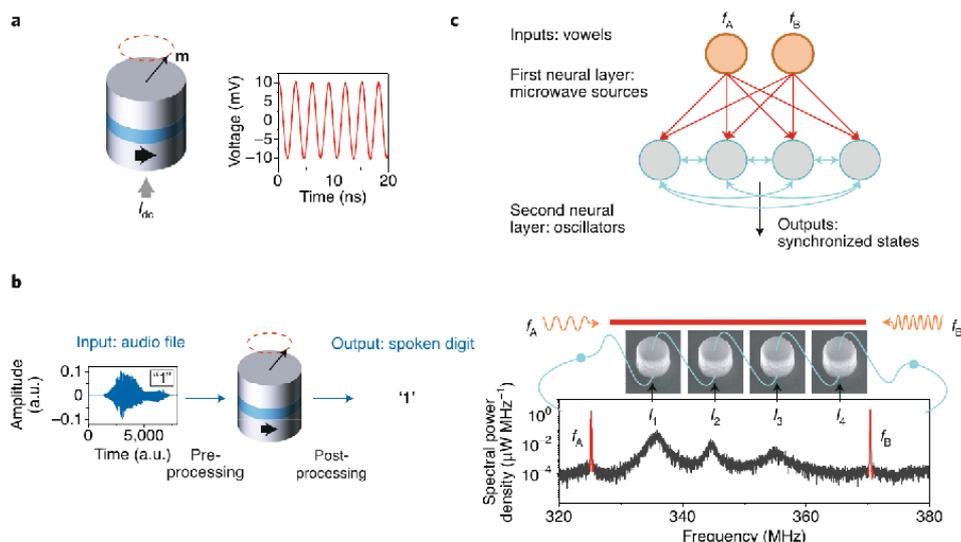


Рис. 4. Двумерная сеть магнито-электрических ячеек для обработки больших массивов данных [5]

Намагниченность свободного слоя совершает прецессию при протекании через туннельный переход постоянного тока. Из-за колебаний магнитосопротивления, в ответ на постоянную силу тока получаем переменное выходное напряжение. У такого осциллятора есть несколько свойств полезных для нейроморфных вычислений. Во-первых, амплитуда колебаний обладает «памятью», так как величина затухания конечна и релаксация происходит не мгновенно. Во-вторых, частота и амплитуда осцилляций напряжения являются существенно нелинейными, что позволяет нам

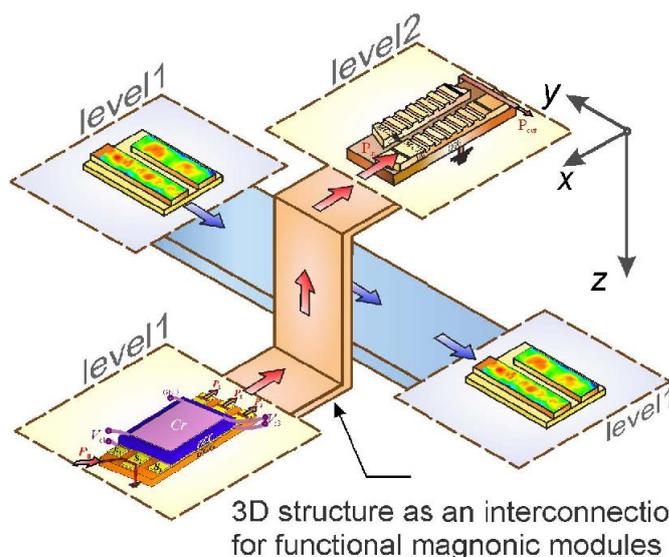
использовать нелинейные активационные функции. И, наконец, можно связывать такие осцилляторы посредством обменного взаимодействия, магнитных полей или электрических токов.



**Рис. 5. Нейроморфные вычисления с помощью наноосцилляторов на переносе спинового момента [19]**

### 2.3. 3D магнетика

Для дальнейшего развития устройств магнетической логики важным является совершенствование подбора материалов и точности изготовления волноведущих структур. Межсоединения на их основе позволят соединять логические блоки между собой, образуя масштабные интегральные схемы. Более того, возможно преодоление планарных ограничений на разводку элементов по плате и выход в 3D геометрию [20] (см. рис. 6). Такая вертикальная интеграция 3D магнетических структур может увеличить плотность размещения магнетических и спинтронных элементов. Вдобавок такие 3D структуры могут позволить сократить длину необходимых межсоединений [6].



**Рис. 6. Схематическое изображение 3D сетей магнетических волноводов, соединяющих функциональные элементы, расположенные на разных уровнях по вертикали. Сигнал закодирован спиновыми волнами [20].**

Связь между волноводами, расположенными на разных уровнях, может осуществляться через дипольное взаимодействие или напрямую с помощью распространения спиновых волн по вертикальным магнитным участкам, соединяющим их. В упомянутых выше ссылках продемонстрировано, что при корректном соотношении геометрии изгибов с направлением магнитного поля, а также геометрических размеров с длинами спиновых волн, возможно прохождение сигналов без существенных потерь на отражения.

### 3. Стрейнтроника

С каждым годом стремительно растет объем энергопотребления, приходящийся на вычисления. Уже сейчас критически важной задачей, стоящей перед электроникой, является поиск новых способов энергосбережения при обработке информации. Одним из таких способов является использование физических эффектов в твердых телах, возникающих при деформациях, вызывающих изменения в зонной структуре, электрических, магнитных, оптических и других свойствах. Это направление называется стрейнтроникой (от англ. Strain — натяжение) [7]. В рамках данного обзора сосредоточимся на магнитоупругих взаимодействиях. Мы их уже касались в Разделе 2.2, где рассматривалась композитная магнитоэлектрическая ячейка. Однако существуют материалы, обладающие сразу как ферромагнитными, так и ферроэлектрическими свойствами (вещества обладающие сразу несколькими видами упорядочения называются мультиферроиками).

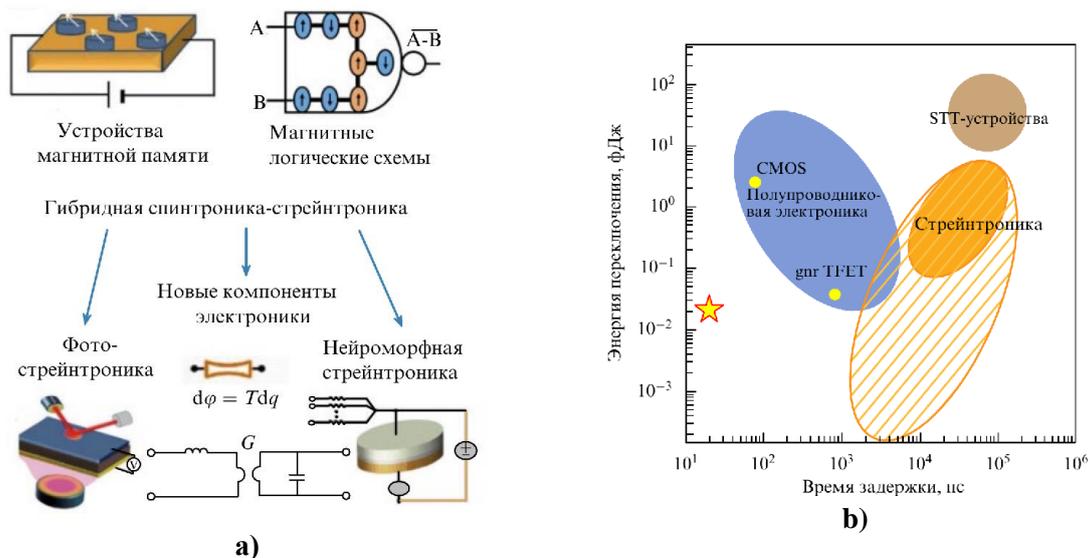


Рис. 7. а) Основные устройства стрейнтроники и б) диаграмма характеристик электронных устройств. [7]

Основным элементом магнитной стрейнтроники является гетероструктура из магнитного слоя, анизотропия которого задается деформацией подложки (см рис. 7а). Предполагается, что именно в этой области реализуется возможность сверхнизкого потребления энергии, вплоть до единиц аДж, приближаясь к фундаментальным термодинамическим пределам. Например, к пределу Ландауэра  $k_B T \ln 2$  – минимальной энергии, выделяемой при стирании одного бита информации. Хотя и на настоящий момент реально существующие прототипы стрейнтронных устройств (сплошная заливка на рис. 7б) далеки от теоретических оценок (заштрихованная область).

Для стрейнтроники деформация материала является лишь посредником, с помощью которого можно воздействовать на другие подсистемы. Взаимодействие

между подсистемами происходит за счет перекрестных эффектов. В частности, магнитоупругий эффект (эффект Виллари) — это изменение намагниченности магнетика при его механической деформации, он присущ в разной степени всем магнитоупорядоченным кристаллам. Обратной по отношению к нему является магнитострикция — деформация магнетика в магнитном поле. Оба эти эффекта являются проявлениями магнитоупругого взаимодействия, обусловленного зависимостью основных взаимодействий магнитных моментов ионов или атомов от расстояния между ними.

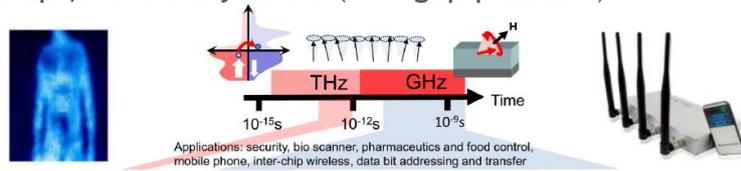
В большинстве случаев механическая деформация в стрейнтронных гетероструктурах наводится электрически, с помощью слоя пьезоэлектрика [21]. Однако, возможны и другие способы управления намагниченностью — статические (наведенная ростовая анизотропия, вызванная несопадением периодов кристаллов магнетика и подложки, существенно отличающаяся от анизотропии того же магнетика в объемной структуре), «медленные» (механические напряжения, термоиндуцированные) и «быстрые» (например, возникающие при взаимодействии фемтосекундных лазерных импульсов с магнитной, упругой и электронной подсистемой магнетика).

#### **4. Антиферромагнитная спинтроника**

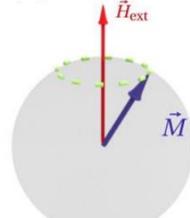
Существенный выигрыш в энергоэффективности устройств стрейнтроники сопровождается, к сожалению, довольно медленными скоростями работы. Однако, в последние годы бурно развивается область магнотонной спинтроники, тесно связанная с изучением эффектов, возникающих в антиферромагнетиках [8]. Это материалы, в которых две или несколько магнитных подрешеток полностью или почти полностью скомпенсированы, не образуя макроскопического магнитного момента. С этим связаны определенные сложности возбуждения и детектирования магнитной динамики. Например, можно связать антиферромагнитный слой обменным взаимодействием со слоем ферромагнетика. Тогда можно определить динамику «невидимого» антиферромагнитного слоя косвенным образом наблюдая движение намагниченности в ферромагнетике.

С другой стороны, в отличие от ферромагнетиков, где сильное внутренне поле Вейсса ориентирует спины в одном направлении, но не влияет на их динамику, в антиферромагнетиках динамика подрешеток оказывается обменно-усиленной (см рис. 8). То есть в уравнении движения антиферромагнетика появляется огромное обменное поле (например, порядка 1000 Тл), существенно образом повышая собственные частоты. Объединяя преимущества быстрогодействия переключений магнитной подсистемы в антиферромагнетиках, возможность возбуждения динамики с помощью электрических сигналов и перестройку параметров осцилляторов механическими деформациями, можно создать целый новый класс источников [21] и приемников [22] для заполнения «терагерцового провала».

Нехватка методов и устройств для приёма и генерации терагерцового излучения (THz gap problem)



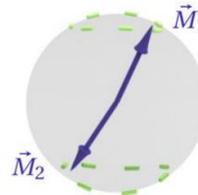
### Ферромагнетики



$$H_{\text{ext}} \approx 1 \text{ T}$$

$$\omega_{\text{FMR}} = \gamma \sqrt{H_{\text{ext}} H_{\text{dip}}} \approx 1 - 20 \text{ GHz}$$

### Антиферромагнетики



$$H_{\text{ex}} \approx 10^3 \text{ T}$$

$$\omega_{\text{AFMR}} = \gamma \sqrt{H_{\text{ex}} H_a} \approx 500 \text{ GHz} - 1.5 \text{ THz}$$

**Рис. 8. Обменное усиление в динамике антиферромагнетиков повышает рабочие частоты вплоть до ТГц области.**

## 5. Заключение. Перспективы.

Данный обзор затронул лишь небольшую долю направлений магноники, однако, уже нашедших практическое применение. Дальнейшие перспективы использования магنونных структур в системах обработки и хранения информации неразрывно связаны с возможностью интеграции устройств магنونной логики и стандартных полупроводниковых интегральных схем в рамках единого технологического процесса [23, 24]. В частности, продемонстрирована возможность роста ферритовых пленок на полупроводниковых подложках различных видов (Si, GaAs, SiC, GaN).

Помимо спиновых волн в качестве носителя информации могут выступать и доменные границы, на основе которых может быть реализован даже специальный тип памяти — racetrack memory [25]. Доменные границы и сами могут выступать в качестве волноводов для магنونных возбуждений [26].

Еще одной перспективной областью исследований в настоящий момент является квантовая магноника, находящаяся на пересечении спинтроники и квантовой информатики [27]. Рамках этой экзотической области возможно и рассмотрение бозе-эйнштейновской конденсации магнонов при комнатной температуре [28] и РТ-симметричные системы (относительно оператора четности и времени) [29].

*Результаты, представленные в данной лекции, получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FFWZ-2022-0015).*

## Литература

1. A.V. Chumak, V.I. Vasyuchka, A.A. Serga, B. Hillebrands. Magnon spintronics // Nature Physics. - 2015. - V. 11. - P. 453-463.
2. С.А. Никитов и др. Магноника — новое направление спинтроники и спин-волновой электроники // УФН. - 2015. - Т. 185, № 10. - С. 1099-1128.
3. С.А. Никитов и др. Диэлектрическая магноника — от гигагерцев к терагерцам // УФН. - 2020. - Т. 190, № 10. - С. 1009-1040.

4. A. Barman et al. The 2021 magnonics roadmap // *J. Phys.: Condens. Matter.* - 2021. - V. 33. - P. 413001.
5. A. Khitun, M. Bao, K.L. Wang. Magnetic cellular nonlinear network with spin wave bus for image processing // *Superlattices and Microstructures.* - 2010. - V. 47, I. 3. - P. 464-483.
6. Three-Dimensional Magnonics. Layered, Micro- and Nanostructures. Edited by G. Gubbiotti // *Jenny Stanford Publ.* - 2019.
7. А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов. Стрейнтроника — новое направление микро- и нанoeлектроники и науки о материалах // *УФН.* - 2018. - Т. 188, № 12. - С. 1288-1330.
8. W. Zhao et al. Antiferromagnetic spintronics: An overview and outlook // *Fundamental Research.* - 2022. - V. 2. - P. 522-534.
9. Adam, J. D. Analog signal processing with microwave magnetics // *Proc. IEEE.* - 1988. - V. 76. - P. 159–170.
10. Lenk, B., Ulrichs, H., Garbs, F. & Münzenberg, M. The building blocks of magnonics // *Phys. Rep.* - 2011. - V. 507. - P. 107–136.
11. Chumak, A. V., Serga, A. A. & Hillebrands, B. Magnon transistor for all-magnon data processing // *Nature Commun.* - 2014. V. 5. - P. 4700.
12. Cherepanov, V., Kolokolov, I. & L'vov, V. The saga of YIG: Spectra, thermodynamics, interaction and relaxation of magnons in a complex magnet // *Phys. Rep.* - 1993. - V. 229. - P. 81–144.
13. Serga, A. A., Chumak, A. V. & Hillebrands, B. YIG magnonics // *J. Phys. D.* - 2010. - V. 43. - P. 264002.
14. Schneider, T. et al. Realization of spin-wave logic gates // *Appl. Phys. Lett.* - 2008. - V. 92. - P. 022505.
15. Lee, K-S. & Kim, S-K. Conceptual design of spin wave logic gates based on a Mach–Zehnder-type spin wave interferometer for universal logic functions // *J. Appl. Phys.* - 2008. - V. 104. - P. 053909.
16. Slavin, A. & Tiberkevich, V. Nonlinear auto-oscillator theory of microwave generation by spin-polarized current // *IEEE Trans. Magn.* - 2009. - V. 45. - P. 1875–1918.
17. Roman Khymyn, Ivan Lisenkov, Vasyl Tiberkevich, Boris A. Ivanov & Andrei Slavin. Antiferromagnetic THz-frequency Josephson-like Oscillator Driven by Spin Current // *Sci. Rep.* - 2017. - V. 7. - 43705.
18. Chumak, A. V. et al. Direct detection of magnon spin transport by the inverse spin Hall effect // *Appl. Phys. Lett.* 2012. - V. 100. - P. 082405.
19. J. Grollier, D. Querlioz, K. Y. Camsari, K. Everschor-Sitte, S. Fukami and M. D. Stiles. Neuromorphic spintronics // *Nature Electronics.* - 2020. - V. 3. - P. 360-370.
20. A.V. Chumak et al. Roadmap on spin-wave computing // *IEEE Trans Mag.* - 2022. - V. 58, No 6. - P. 0800172.
21. P.A. Popov, A.R. Safin, A. Kirilyuk, S.A. Nikitov, I. Lisenkov, V. Tyberkevich, and A. Slavin. Voltage-Controlled Anisotropy and Current-Induced Magnetization Dynamics in Antiferromagnetic-Piezoelectric Layered Heterostructures // *Phys. Rev. Appl.* - 2020. - V. 13. - P. 044080.
22. Ansar Safin, Sergey Nikitov, Andrei Kirilyuk, Vasyl Tyberkevych and Andrei Slavin. Theory of Antiferromagnet-Based Detector of Terahertz Frequency Signals // *Magnetochemistry.* - 2022. - V. 8. - P. 26.
23. Z. Chen and V. G. Harris. Ferrite film growth on semiconductor substrates towards microwave and millimeter wave integrated circuits // *J. Appl. Phys.* - 2012. - V. 112. - P. 081101.

24. A. Stognij, L. Lutsev, N. Novitskii, A. Bespalov, O. Golikova, V. Ketsko, R. Gieniusz and A. Maziewski. Synthesis, magnetic properties and spin-wave propagation in thin Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> films sputtered on GaN-based substrates // *J. Phys. D: Appl. Phys.* - 2015. - V. 48. - P. 485002.
25. S. Parkin, S.-H. Yang. Memory on the racetrack // *Nature Nanotechnology.* - 2015. - V. 10. - P. 195-198.
26. Felipe Garcia-Sanchez, Pablo Borys, Rémy Soucaille, Jean-Paul Adam, Robert L. Stamps, and Joo-Von Kim. Narrow Magnonic Waveguides Based on Domain Walls // *Phys. Rev. Lett.* - 2015. - V. 114. - P. 247206.
27. H.Y. Yuan, Y. Cao, A. Kamra, R. A. Duine, P. Yan. Quantum magnonics: When magnon spintronics meets quantum information science // *Physics Reports.* - 2022. - V. 965. - P. 1-74.
28. S.O. Demokritov et al. Evidence for spin current driven Bose-Einstein condensation of magnons // *Nature Communications.* - 2021. - V. 12. - P. 6541.
29. O.S. Temnaya, A.R. Safin, D.V. Kalyabin, S.A. Nikitov. Parity-Time Symmetry in Planar Coupled Magnonic Heterostructures // *Phys. Rev. Appl.* - 2022. - V. 18. - P. 014003.