

Научный совет РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы информационно-вычислительных и управляющих систем и материалов для ее создания»
Научный семинар «Исследования в области спинтроники и перспективы создания элементной базы на ее основе»
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 26 июня 2018 г.

Перспективы развития устройств записи и обработки информации на основе магнитных доменов и доменных границ

М.В. Логунов, С.А. Никитов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Обзор доклада

- **Домены и доменные границы в магнитных материалах**
- **Энергонезависимая магнитная запись информации**
Продольная, поперечная запись. Жесткие диски, ленты
- **Твердотельные устройства магнитной памяти**
Память на магнитных сердечниках, на цилиндрических магнитных доменах, на вертикальных блоховских линиях
- **Доменные границы в запоминающих и логических устройствах**
Трековая память, скирмионы. Реконфигурируемые наноэлементы - волноводы, генераторы, интерферометры
- **Быстродействие и энергетические затраты на запись и хранение информации**
Немагнитные методы управления магнитным состоянием. Сверхбыстрый магнетизм
- **Заключение**

Доменные структуры

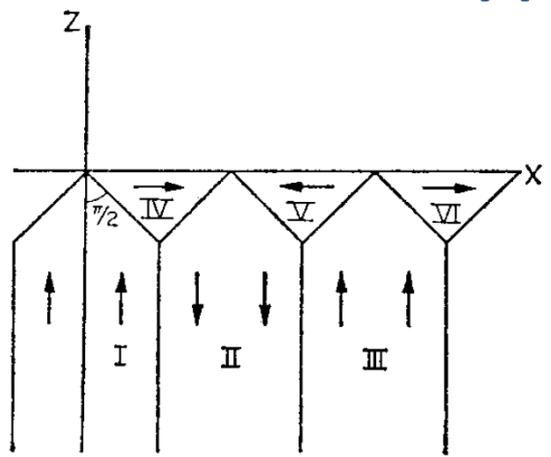


FIG. 1.

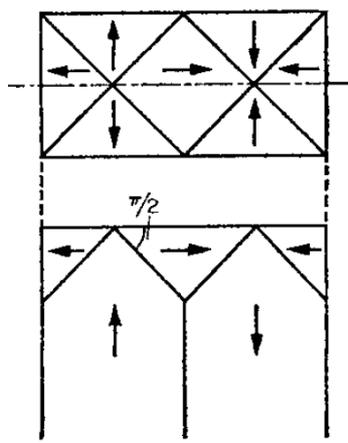
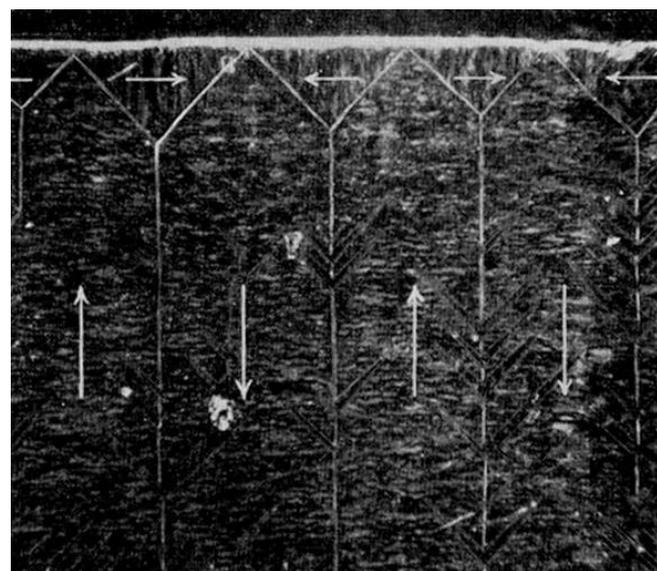


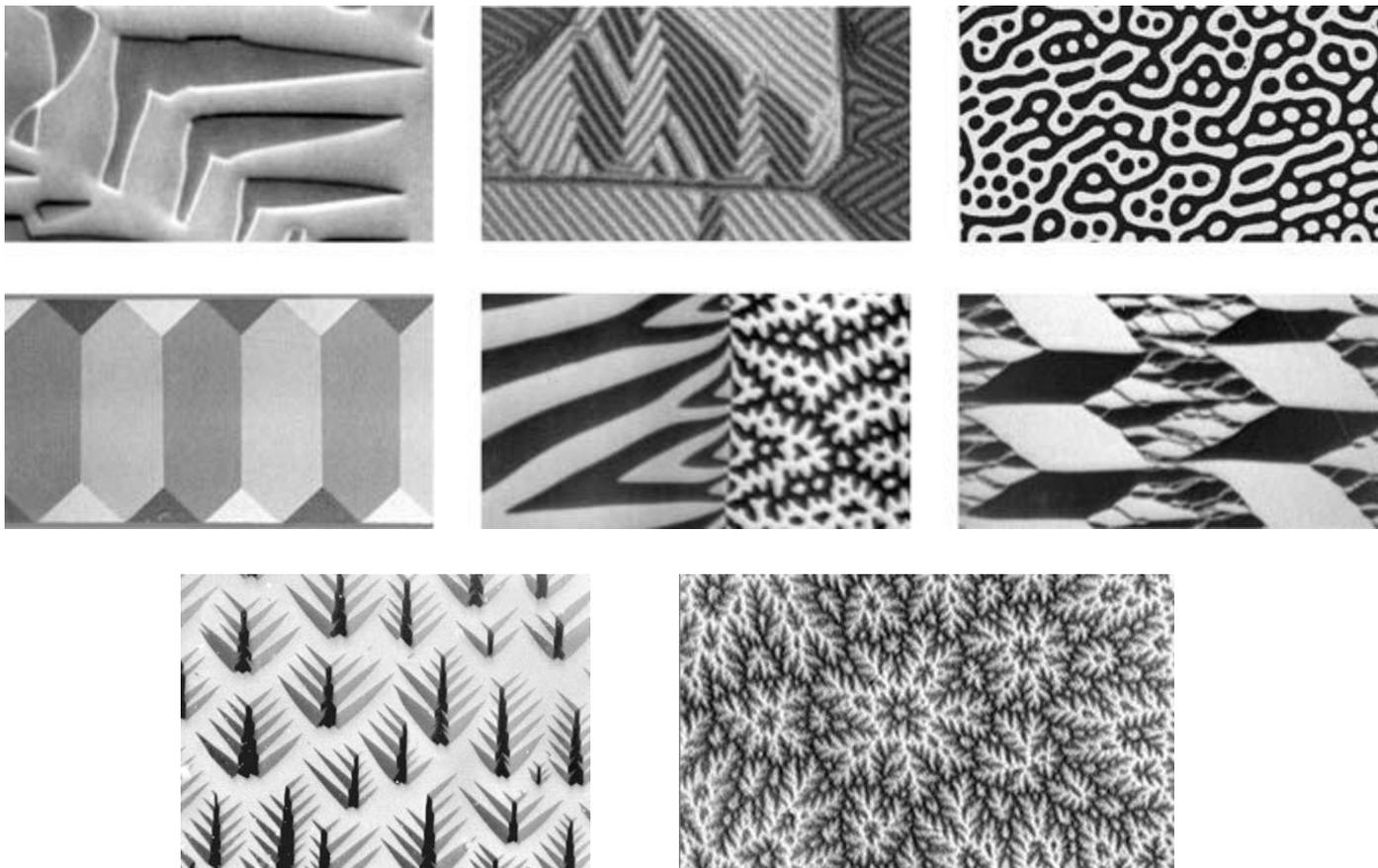
FIG. 3.

L. Landau and E. Lifshitz, On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies, Phys. Z. Sowjet. 8, 153 (1935).



H. J. Williams, Direction of domain magnetization in powder patterns, Phys. Rev. 71, 646 (1947).

Доменные структуры



A. Hubert, R. Schafer. Magnetic Domains (2009)

Доменные структуры

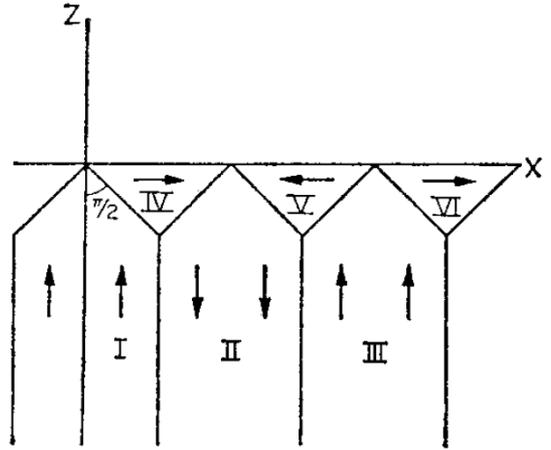


FIG. 1.

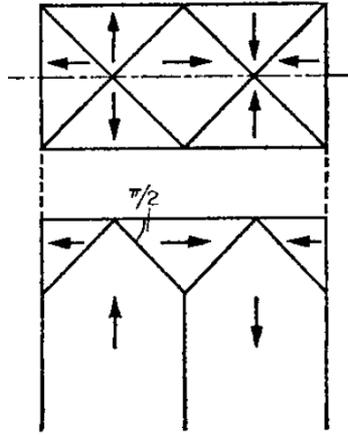
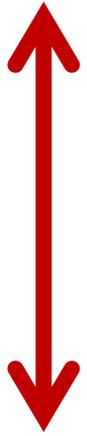
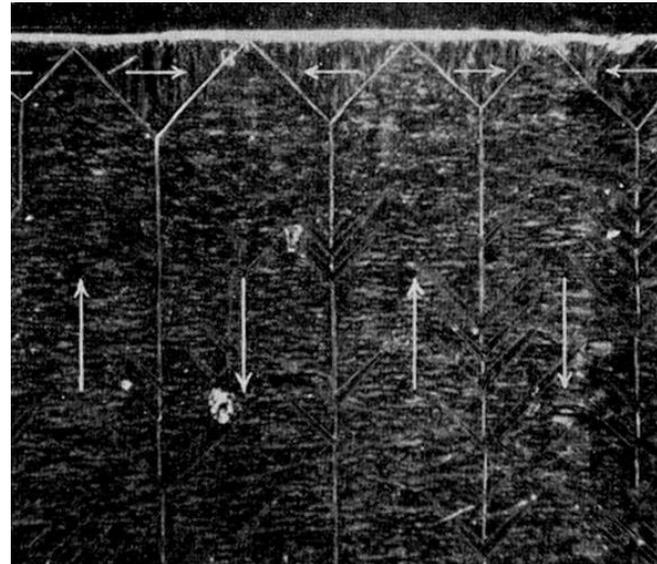


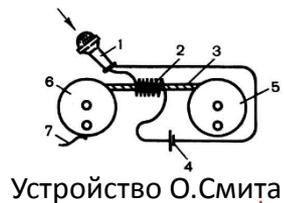
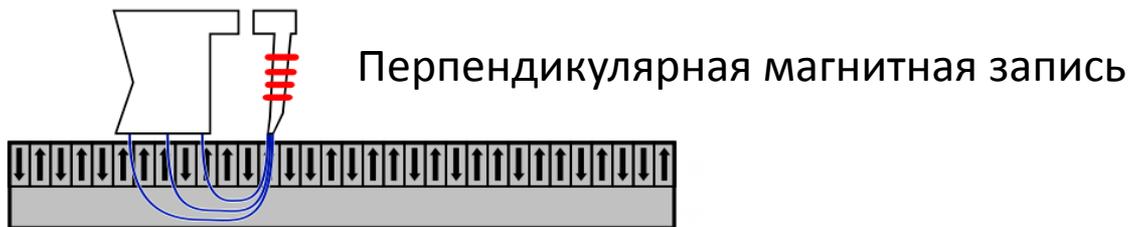
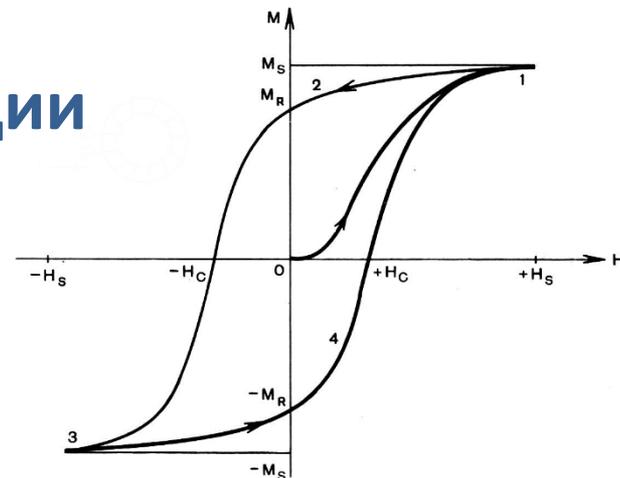
FIG. 3.

L. Landau and E. Lifshitz, On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies, Phys. Z. Sowjet. 8, 153 (1935).



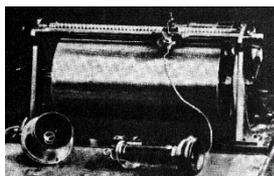
H. J. Williams, Direction of domain magnetization in powder patterns, Phys. Rev. 71, 646 (1947).

Магнитная запись информации



Устройство О.Смита

Кривая намагничивания А.Г. Столетова



Телеграф В. Поульсена



Жесткий диск

Перпендикулярная запись

ГМС

HAMR

1850

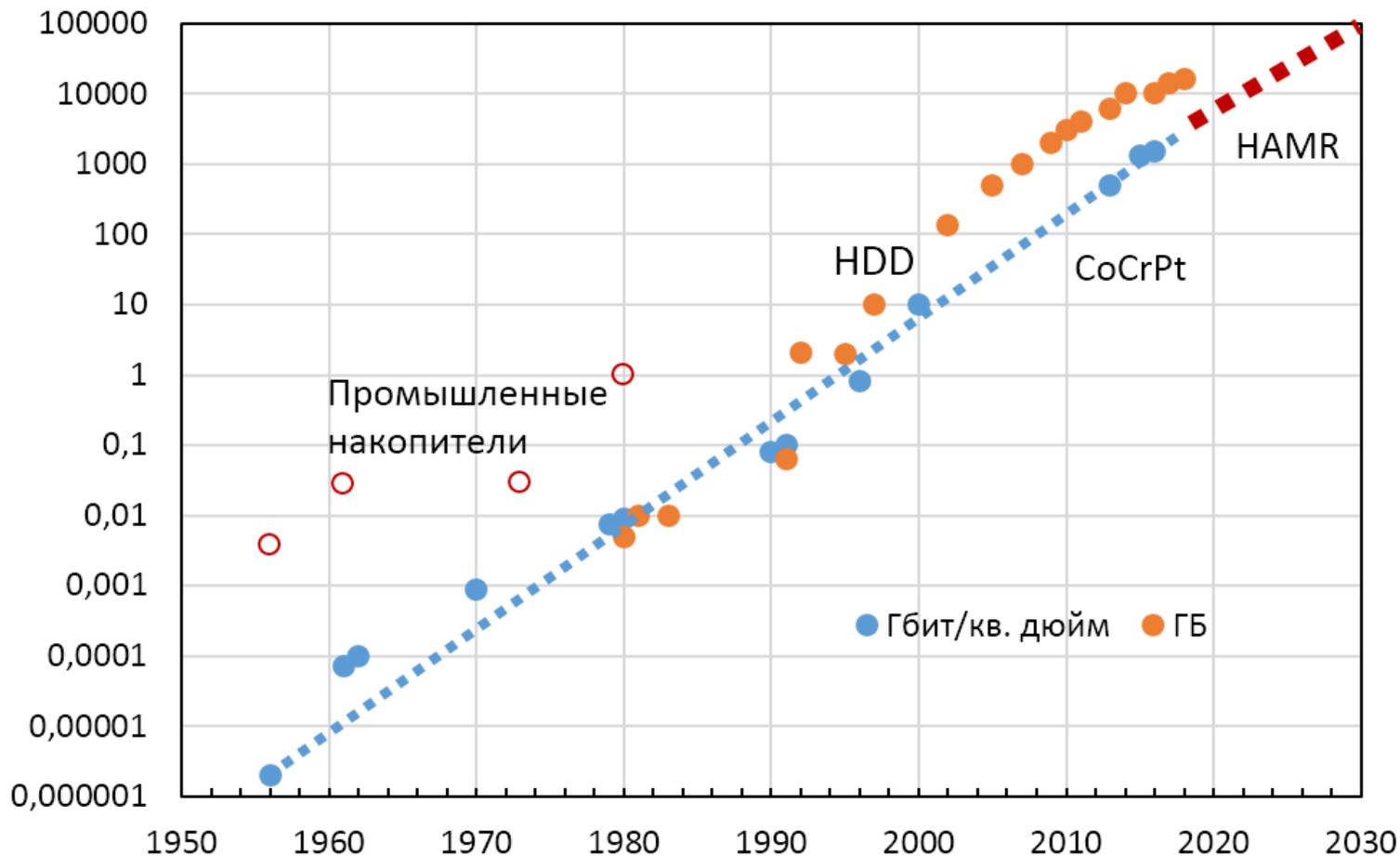
1900

1950

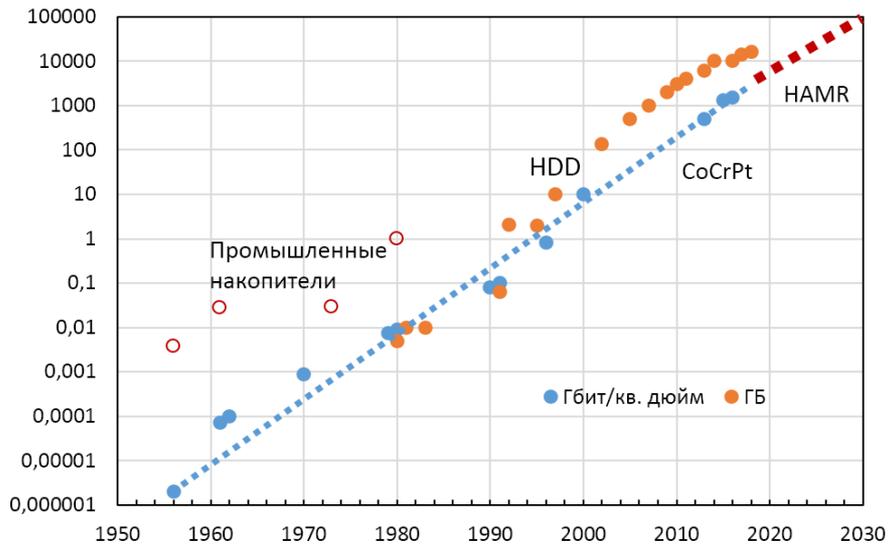
2000

2050

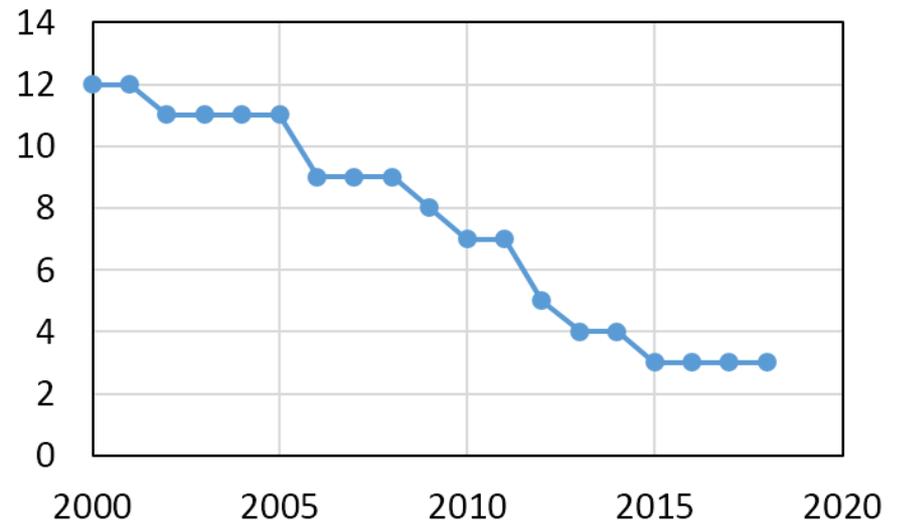
Плотность записи информации и ёмкость жёстких магнитных дисков



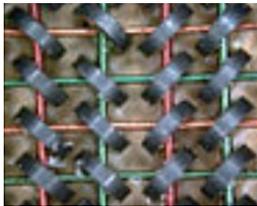
Плотность записи информации и ёмкость жёстких магнитных дисков



Число компаний - производителей жёстких дисков



Твердотельная магнитная память



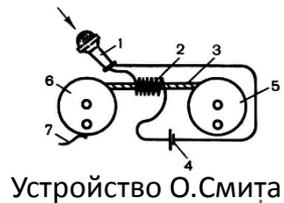
Память на магнитных сердечниках



Память на цилиндрических магнитных доменах

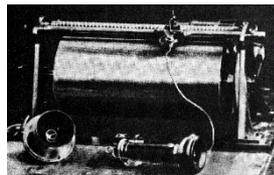


Память на вертикальных блоховских линиях



Устройство О.Смита

Кривая намагничивания
А.Г. Столетова



Телеграф В. Поульсена

Магнитофон

Жесткий диск



Перпендикулярная запись

ГМС

HAMR

1850

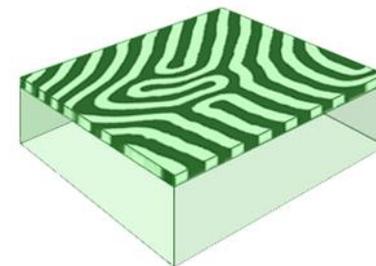
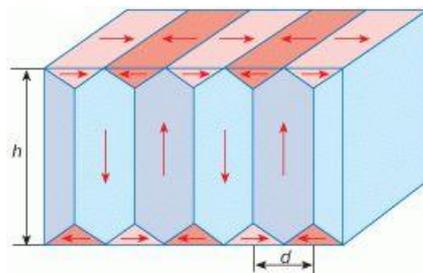
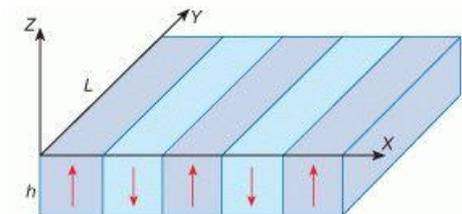
1900

1950

2000

2050

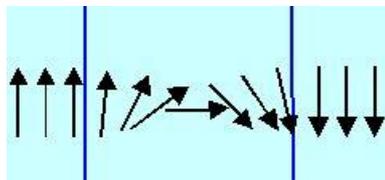
От доменов к доменным границам



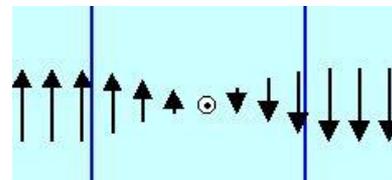
Домены в магнитных пленках



Накопители информации на жестких магнитных дисках. Seagate анонсировала выпуск в 2018 г. 3,5" HDD 16 TB. Рост плотности записи информации HDD в 1 000 000 000 раз как результат развития технологий. В том числе: рост в 1 000 раз благодаря использованию устройств спинтроники – магниторезистивных датчиков.



Неелевские

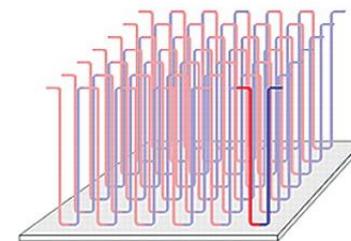
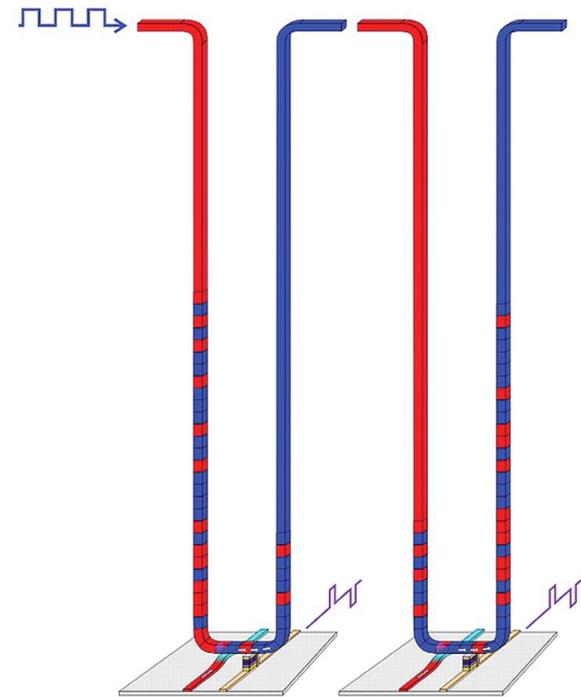
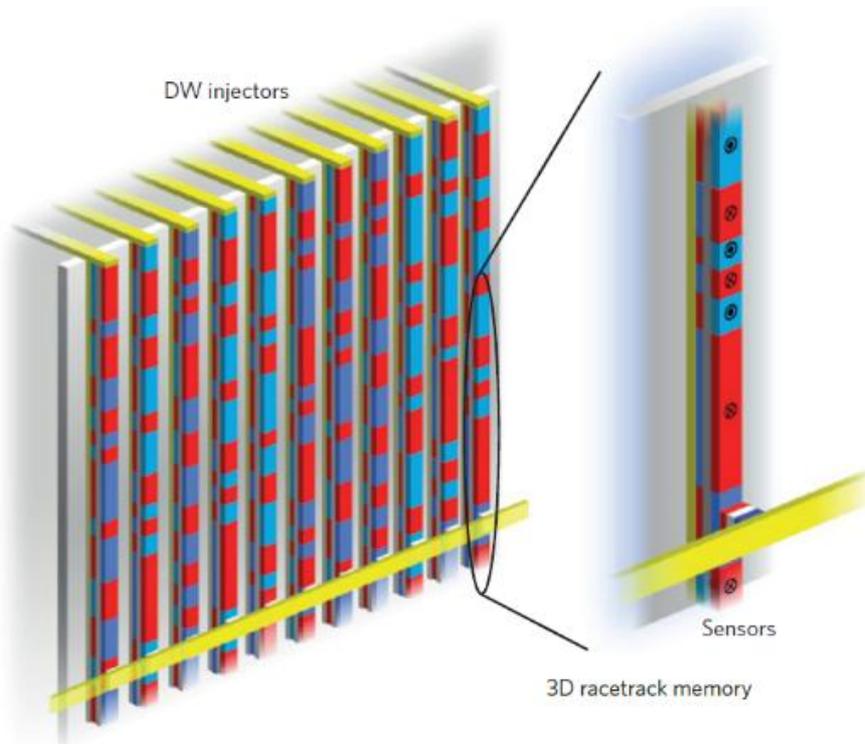


Блоховские

Доменные границы
- мобильные нанообъекты

New physical effects for domain walls in 3D nanowires and nanotubes
A. Fernandez-Pacheco et al., Three dimensional nanomagnetism, Nature Comm. 8, 15756 (2017)

Доменные границы в запоминающих устройствах



«Универсальная» твердотельная память как замена и RAM, и HDD

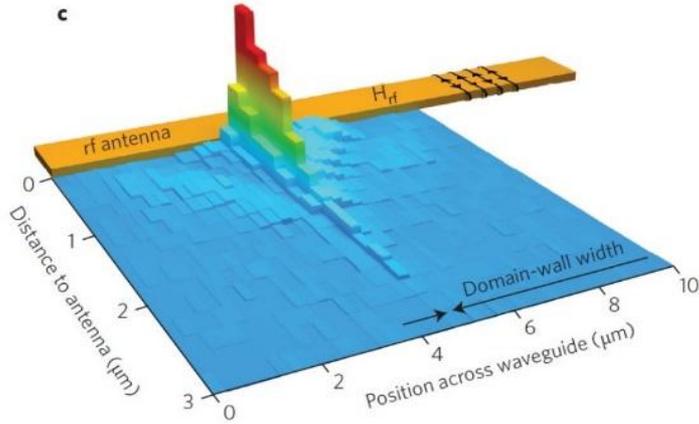
Memory on the racetrack.

3D solid-state device.

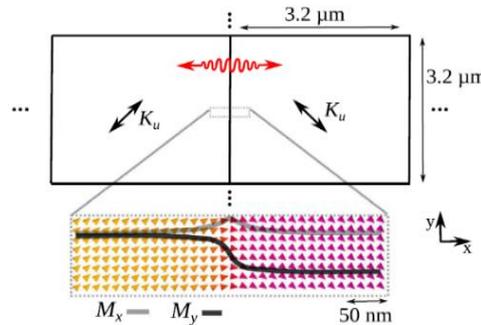
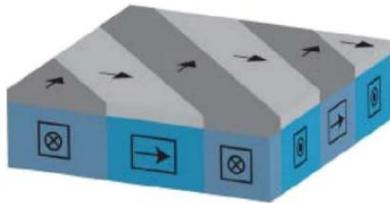
S. Parkin et al., Nature Nanotechnology **10**, 195–198 (2015)

Racetrack storage array

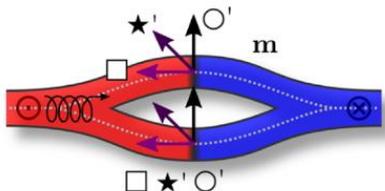
Доменные границы как реконфигурируемые наноэлементы



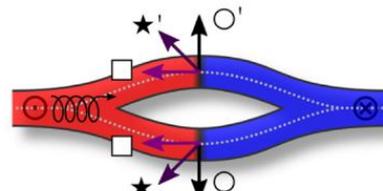
Доменная граница – нановолновод спиновых волн.
K. Wagner et al., Nature Nanotechnology
 10.1038/nnano.2015.339 (2016)



Наногенераторы и
 наноантенны.
 Up to 100 GHz and
 wavelengths down to 20 nm.
B. Van de Wiele et al., Scientific
Reports 6:21330 (2016)



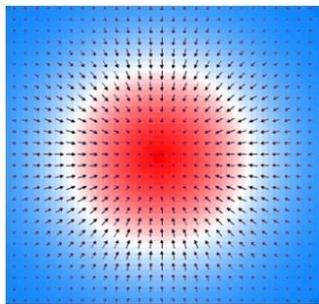
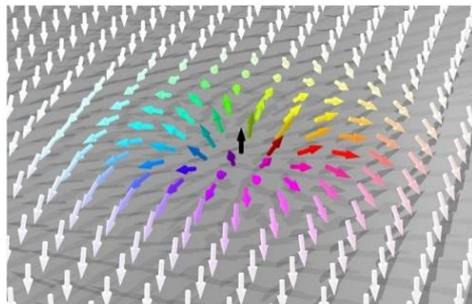
(a) Identical chiralities:
 constructive interference



(b) Opposite chiralities...

Наноинтерферометр на доменных границах.
F. J. Buijnsters et al., Phys. Rev. Lett **116**, 147204 (2016)

Скирмионы как элементы запоминающих и логических устройств



Т. Скирми (1962)

Структура скирмиона

Топологическая устойчивость скирмионов

Скирмионный эффект Холла

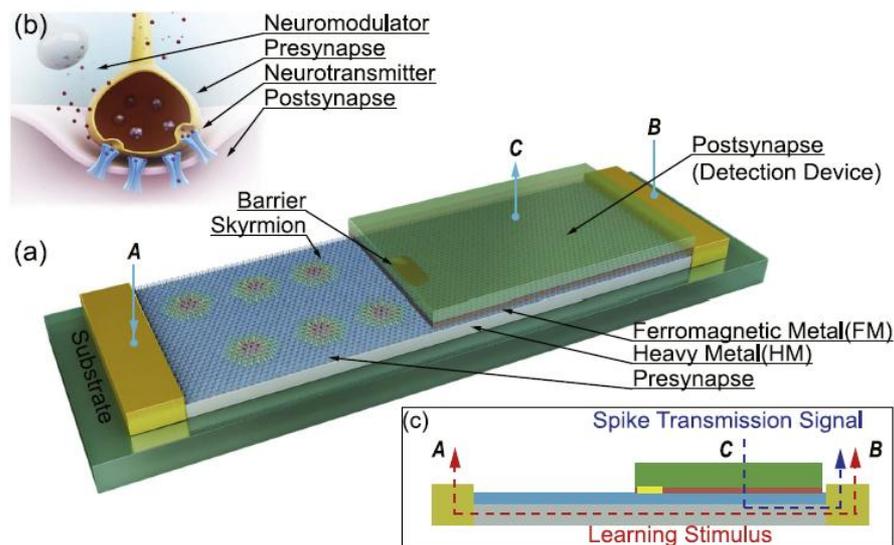
Пленки со скирмионами субнанометровой
толщины

Размеры скирмионов до 1-2 нм

Для перемещения скирмионов может быть
достаточно плотности тока $\sim 10^3$ А/см²

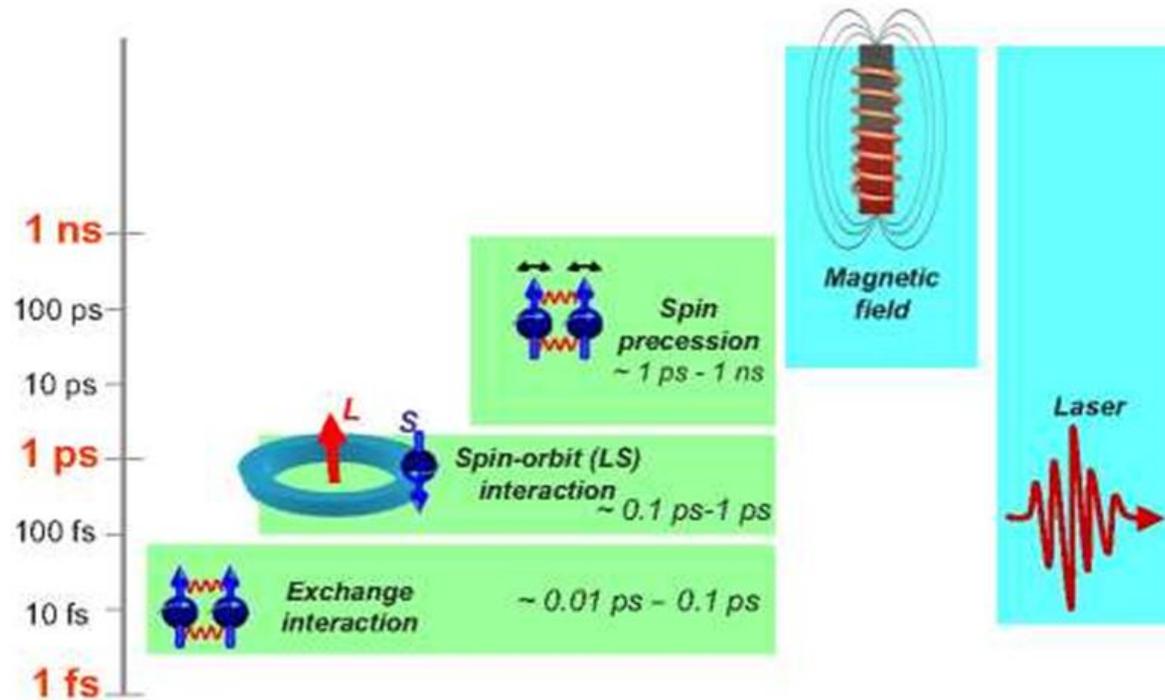
Возможная архитектура запоминающих
устройств на базе скирмионов:

- Как разновидность памяти на решетках ЦМД
- Как разновидность трековой памяти



Y. Huang et al., *Magnetic skyrmion-based synaptic devices*,
Nanotechnology **28**, 08LT02 (2017)

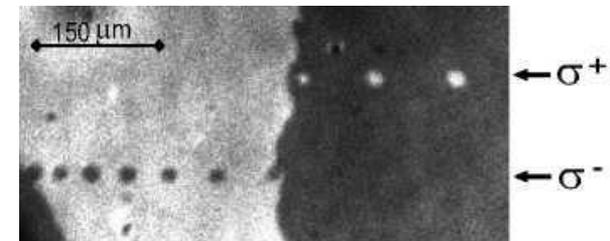
Сверхбыстрые процессы в магнетизме



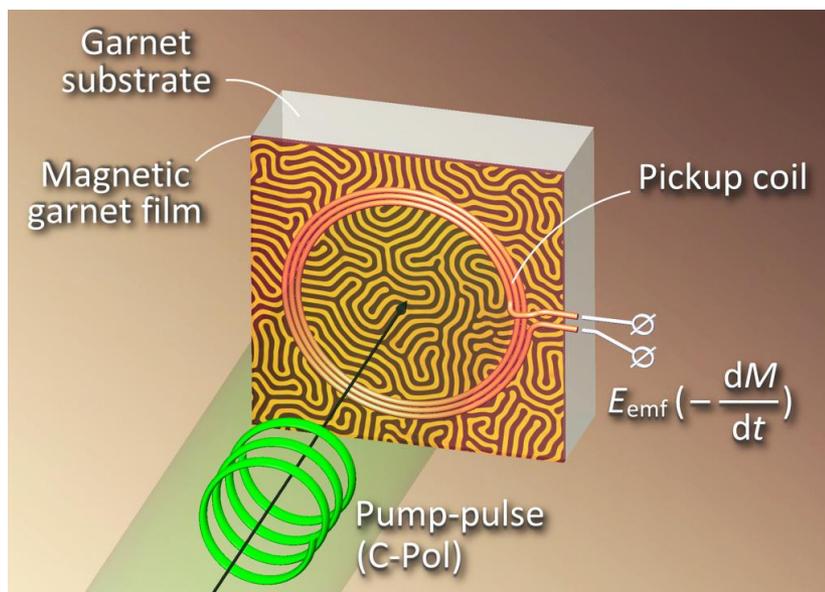
E. Beaurepaire, J.-C. Merle, A. Daunois, and J.-Y. Bigot, PRL **76**, 4250 (1996)
A. Kirilyuk, A. Kimel, and T. Rasing, Rev. Mod. Phys. **82**, 2731 (2010)

Экспериментально обнаружено возбуждение лазерными импульсами когерентных колебаний спинов с частотой 22 ТГц в антиферромагнетике
D. Bossini et al., Nature Communications **7**, 10645 (2016)

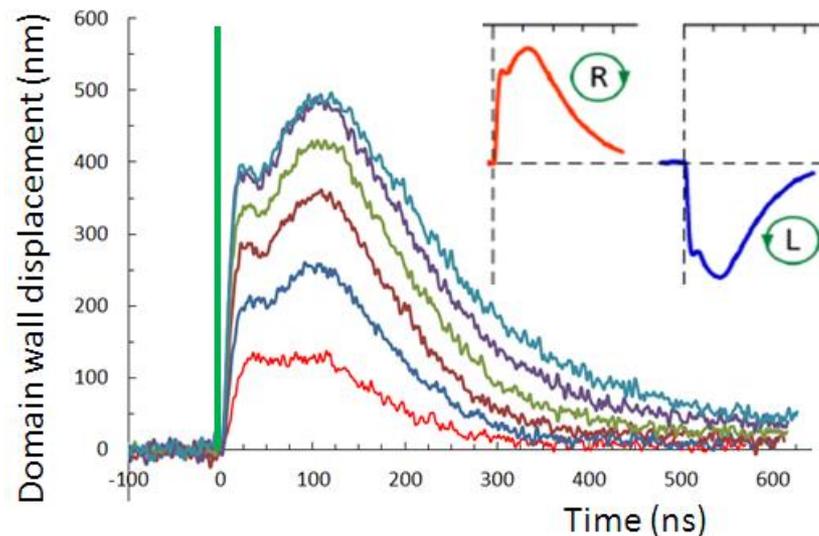
The 2017 Magnetism Roadmap, J. Phys. D: Appl. Phys. **50**, 363001 (2017)



Индуцированное лазерным импульсом движение доменных границ



Магнитооптический дифракционный и индукционный методы исследования



Движение доменных границ под действием лазерного импульса с циркулярной поляризацией. Направление движения зависит от направления поляризации.

M.V. Gerasimov et al. Phys. Rev. B. 94, 014434 (2016); Instrum. Exp. Tech. 60, 716 (2017)

Domain-wall control by means of non-magnetic effects

APPLIED PHYSICS LETTERS **110**, 222401 (2017)



Magnetoelastic write and read operations in a stress-mediated multiferroic memory cell

Alexey Klimov,^{1,2,3} Nicolas Tiercelin,² Yannick Dusch,² Stefano Giordano,² Théo Mathurin,² Philippe Pernod,² Vladimir Preobrazhensky,^{2,4} Anton Churbanov,^{1,5} and Sergei Nikitov^{1,5}

¹Joint International Laboratory LIA LICs: V. A. Kotel'nikov Institute of Radioeng. and Electronics (IRE RAS), ul. Mokhovaya 11/7, Moscow 125009, Russia

²Joint International Laboratory LIA LICs: University Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, University Valenciennes, UMR 8520 - IEMN, F-59000 Lille, France

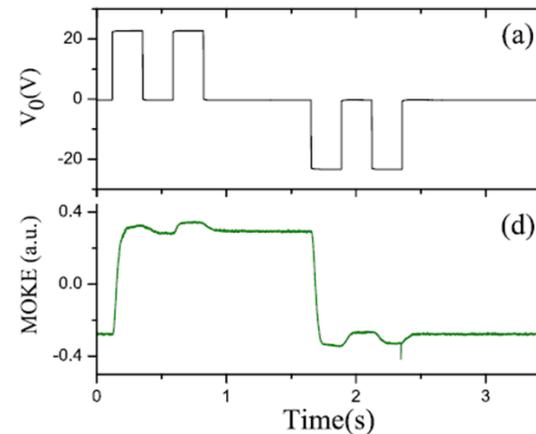
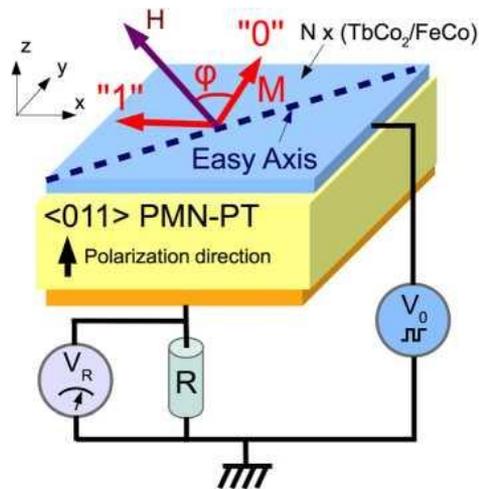
³Joint International Laboratory LIA LICs: Moscow Technological University (MIREA) Vernadsky Avenue 78, Moscow 119454, Russia

⁴Joint International Laboratory LIA LICs: Wave Research Center, A.M.Prokhorov GPI, RAS, ul. Vavilova 38, Moscow 119991, Russia

⁵Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Institutskiy lane, 9, 141700, Russia

60 aJ

energy for writing a bit in a memory cell



Энергоэффективность



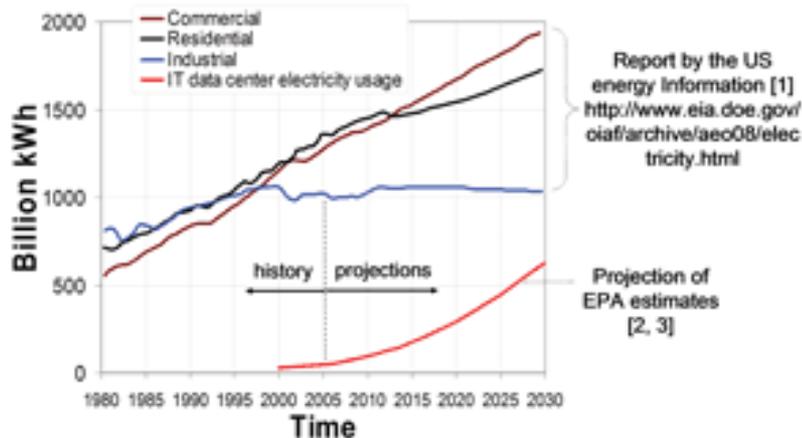
Информационные системы
потребляют 5-7%
производимого электричества

Энергопотребление при элементарных
логических операциях:

~1 пДж – электроника

~80 аДж – полностью оптическая
запись на магнитном носителе
A. Stupakiewicz et al., Nature 542, 71 (2017)

~60 аДж – индуцированная
механическими напряжениями
магнитная запись
A. Klimov et al., Appl. Phys. Lett. 110, 222401 (2017)



Заключение

- Домены и доменные границы являются основой для существующих (HDD) и перспективных твердотельных энергонезависимых устройств записи информации.
- Доменные границы и скирмионы – ключевые элементы разрабатываемых логических реконфигурируемых наноустройств: волноводов, генераторов и модуляторов спиновых волн, нейроморфных магنونных процессоров с рабочими частотами до десятков ТГц.
- Активно изучаются различные методы управления доменными границами и скирмионами: традиционно – с помощью магнитного поля, а также с помощью импульсов тока, механических напряжений и лазерных импульсов.
- Потенциально устройства на базе доменов, доменных границ и скирмионов могут обладать рекордными размерами элементов (~ 1 нм) и быстродействием (< 100 фс), высокой энергоэффективностью: для записи бита информации достаточно энергии менее 100 аДж.

Спасибо за внимание

