

Магниторезистивная память с записью электрическим полем

А.И. Морозов

*Московский физико-технический институт
(государственный университет)*

Рассмотрены проблемы создания магниторезистивной памяти с записью электрическим полем (MERAM), основанной на обменном, зарядовом или упругом взаимодействии между электрочувствительным слоем и ферромагнитным слоем, входящим в состав магнитного туннельного соединения. Найдены ограничения на размер ячейки, связанные с существованием суперпарамагнитного порога.

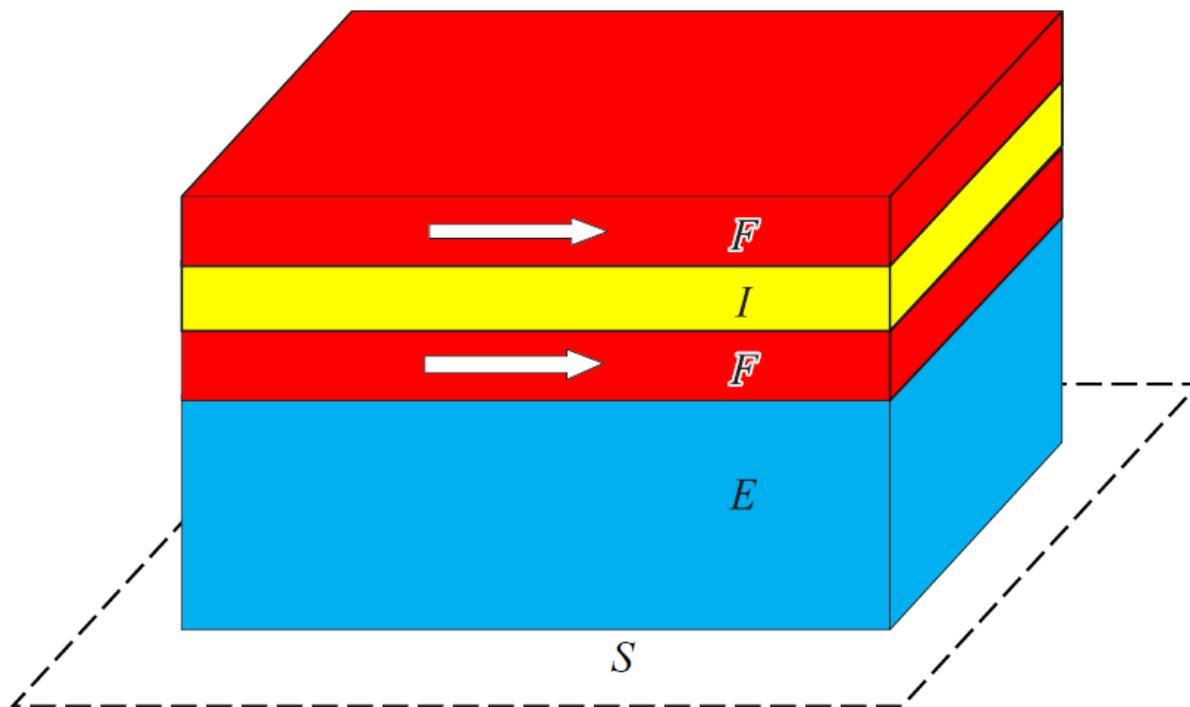


Рис. 1. Магниторезистивная память на основе эффекта туннельного магнетосопротивления с записью электрическим полем. F – ферромагнитные слои, I – слой изолятора, E – электрочувствительный слой, S – подложка.

На данный момент обсуждаются три
главных механизма взаимодействия между
ферромагнитным и электрочувствительным
слоем:

- обменная связь;
- упругая связь;
- зарядовая связь.

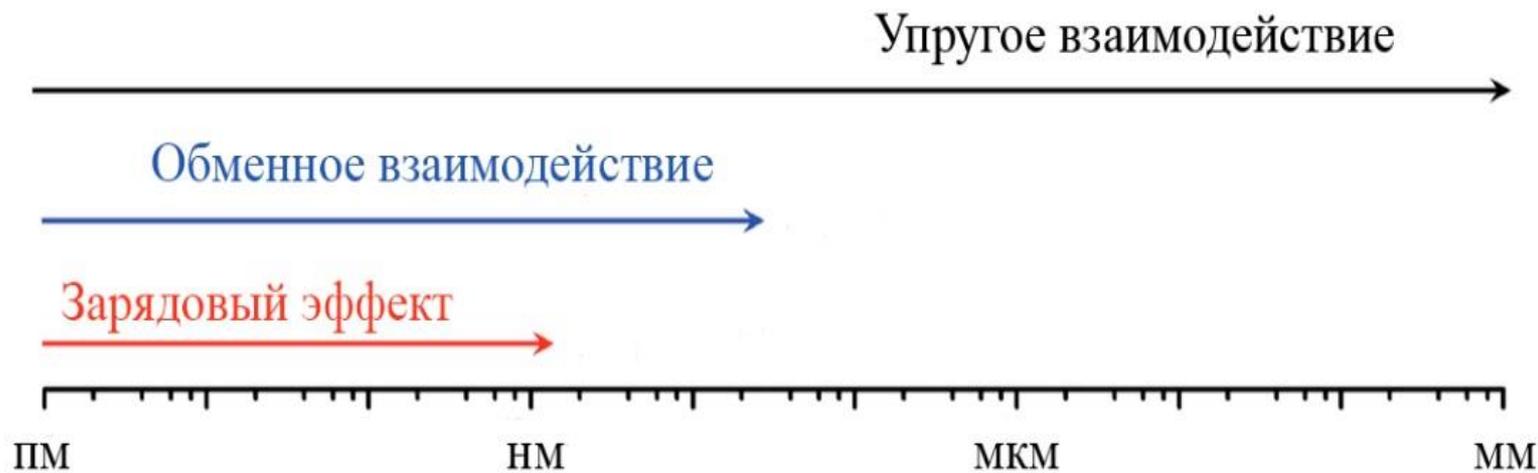


Рис. 2. Схематическое изображение характерных толщин для трех механизмов межслойного взаимодействия.

Зарядовая связь

1. Электрочувствительный слой – сегнетоэлектрик.

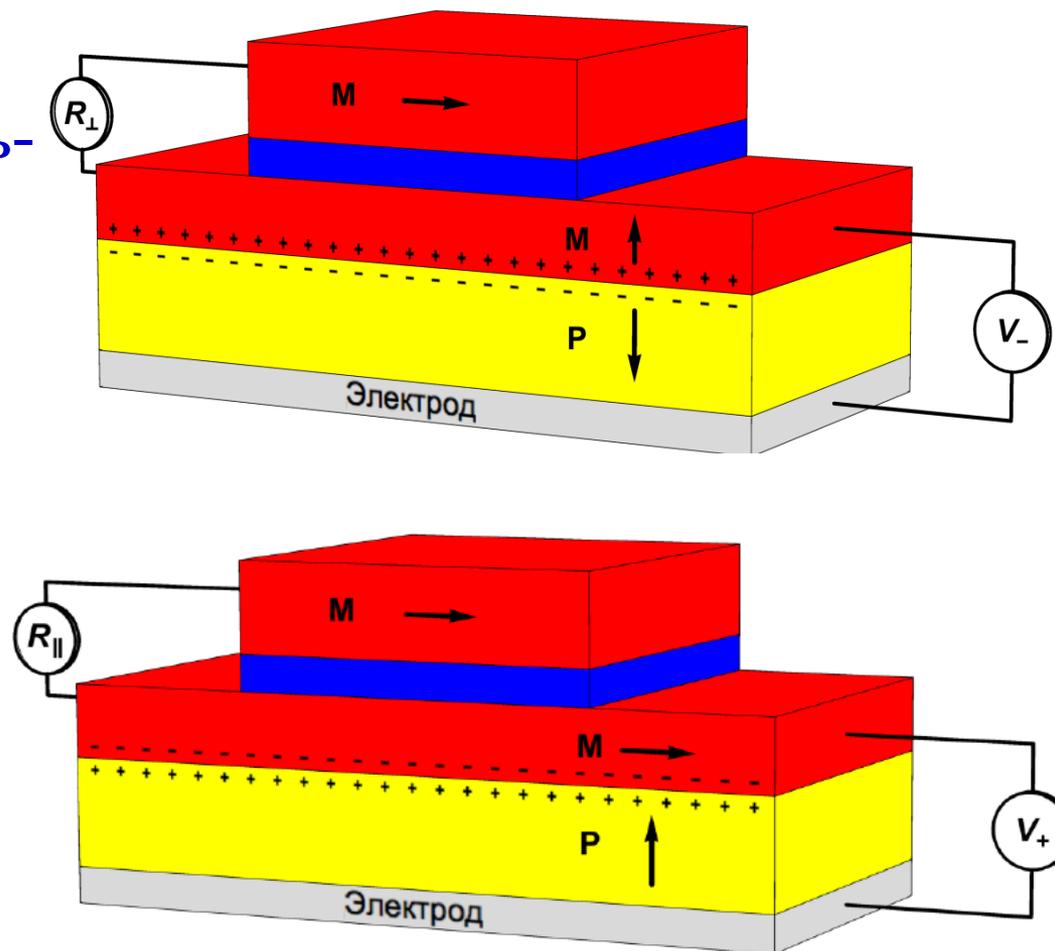


Рис.3. **MEMRAM** на основе зарядового (кулоновского) взаимодействия между слоями.

$$w = \left\{ \frac{1}{2} \mu_0 M_s^2 + \frac{1}{d} (K_s + \Delta K_s(V)) \right\} \cos^2 \varphi,$$

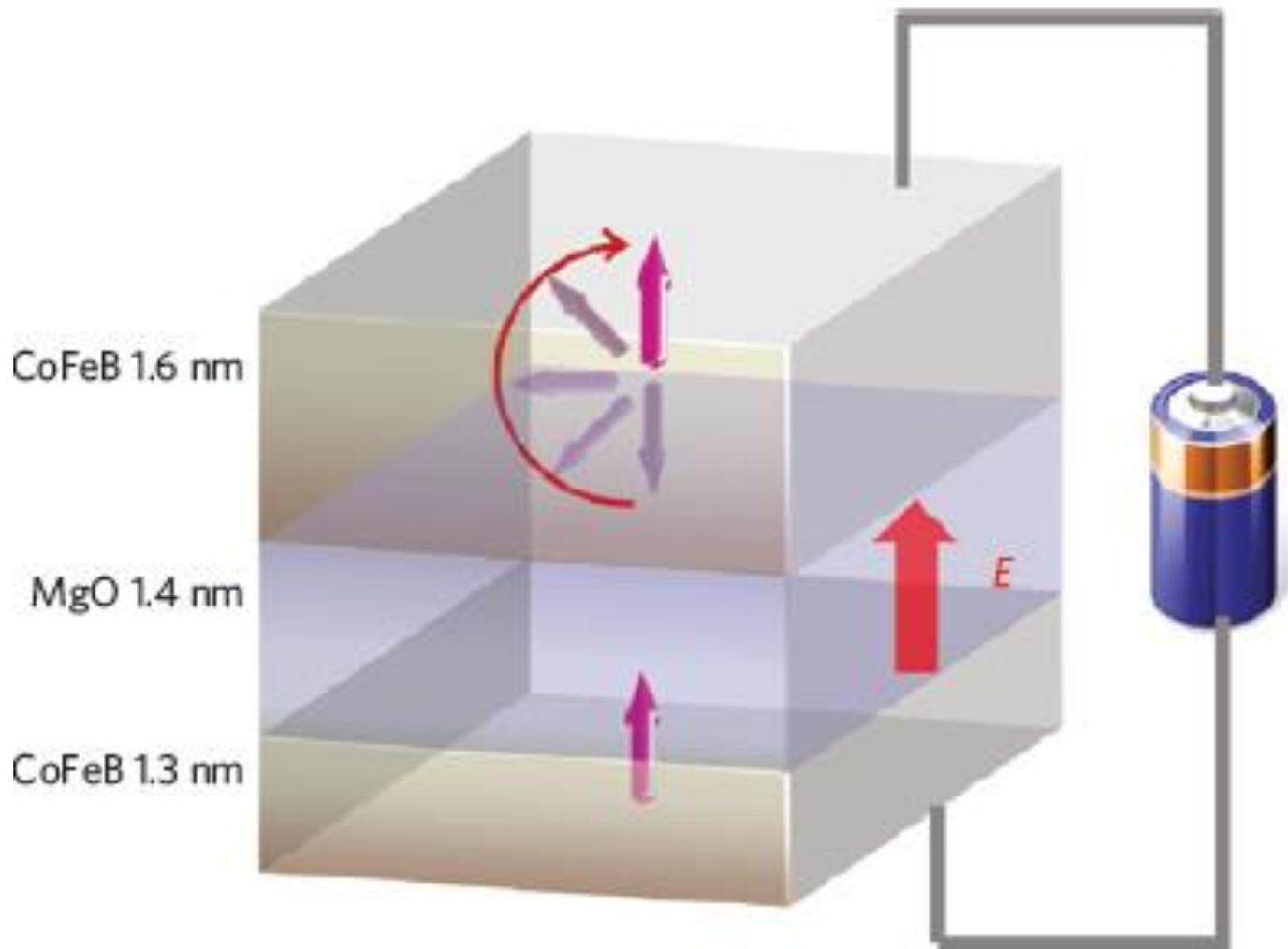
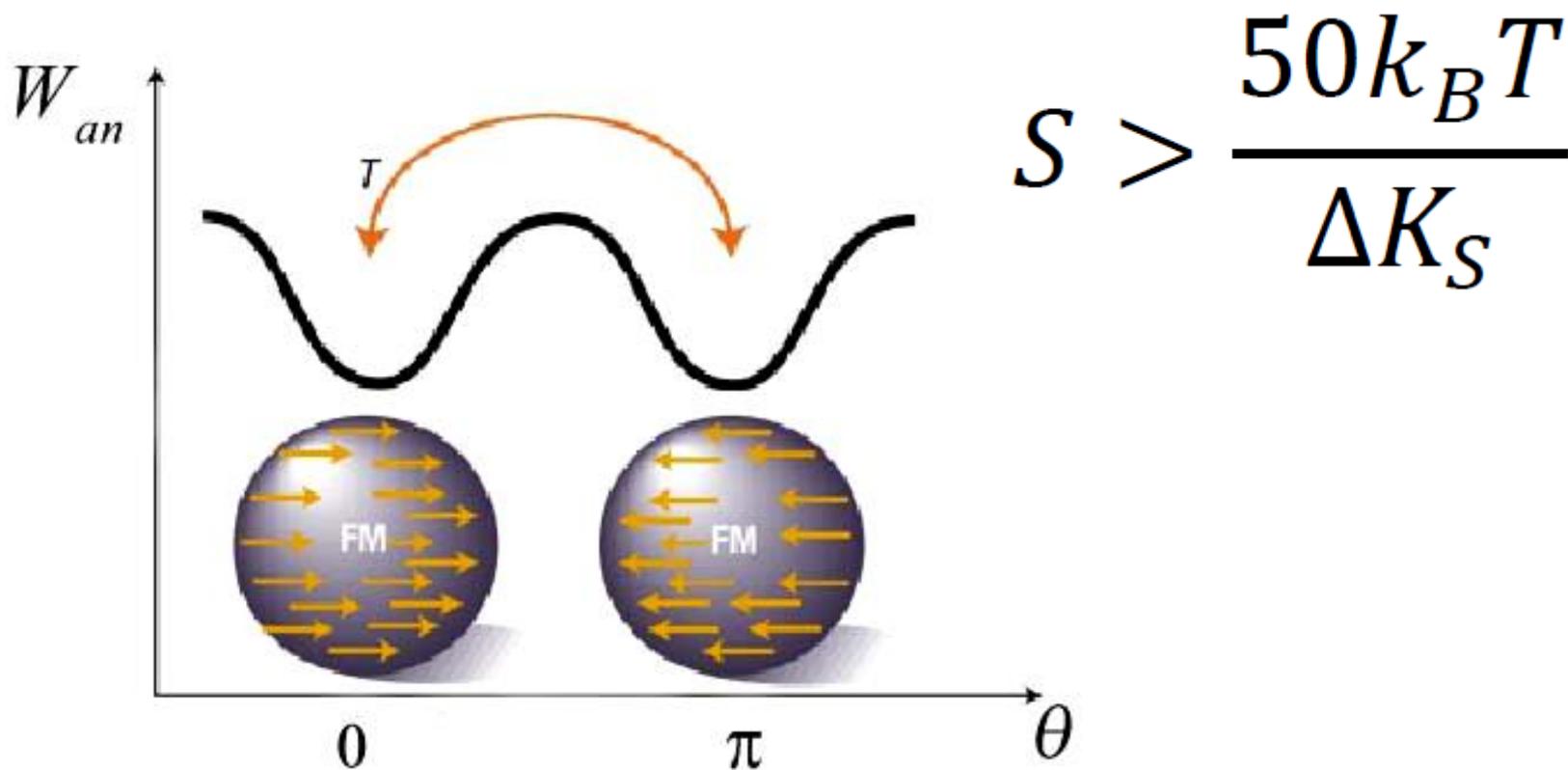


Рис. 4. W-G Wang et al. Nature Materials **11**, 66 (2012).

Суперпарамагнитный порог



В полях $E \sim 10^7$ В/м для Fe/MgO или CoFe/BST

$$\Delta K_s \sim 7-8 \text{ мкДж/м}^2$$

[Z. Zhou et al. Sci. Rep. **5**, 7740 (2015)].

Получаем $S_{\min} \sim 200 \text{ нм} \times 200 \text{ нм}$. Нужны материалы с
большим ΔK_s .

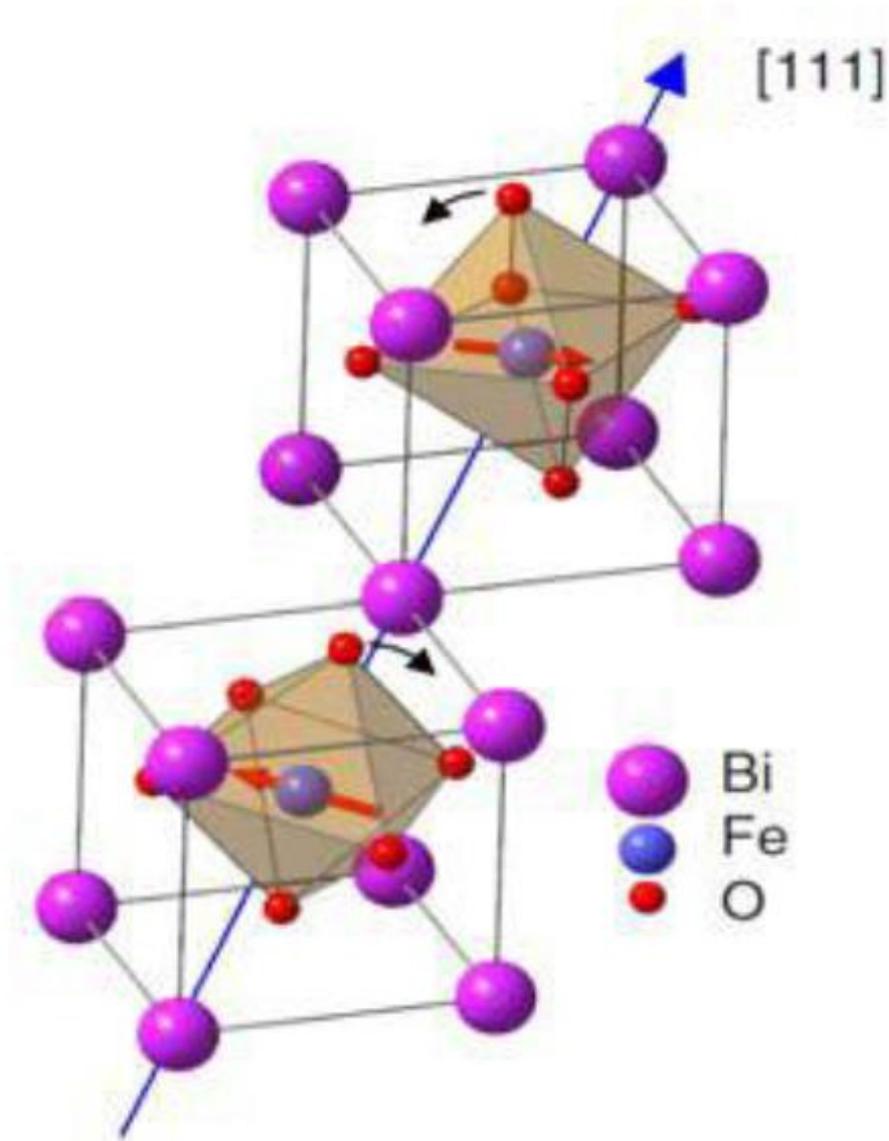
Окончательные выводы по данному виду памяти
делать пока рано.

Обменное взаимодействие слоев

Электрочувствительный слой должен быть магнитоупорядоченным и для иметь спонтанную поляризацию, то есть быть слоем мультиферроика с температурами магнитного и сегнетоэлектрического упорядочения, превосходящими комнатную.

BiFeO_3 , $T_c=1143$ К,
 $T_N=643$ К

Рис. 5. Схематическое изображение $R3c$ структуры BiFeO_3 , собранной из двух кубических ячеек перовскита.



Holcomb M.B., Martin L.W., Scholl A., He Q. et al. Probing the evolution of antiferromagnetism in multiferroics // *Phys. Rev. B*. 2010. 134406 (6 pp).

Упруго-сжатый BiFeO_3 на подложке SrTiO_3

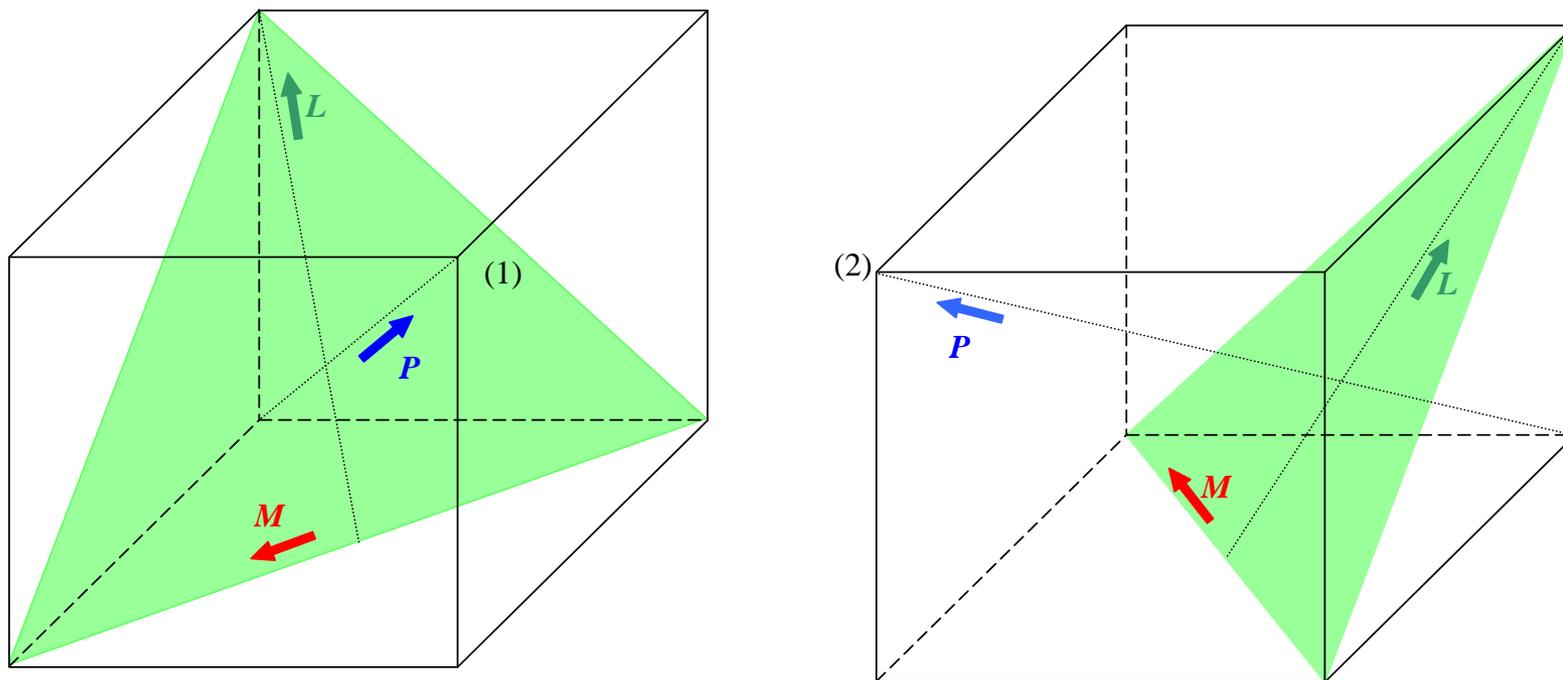


Рис. 6. Ориентация векторов L и M при различных направлениях вектора P .

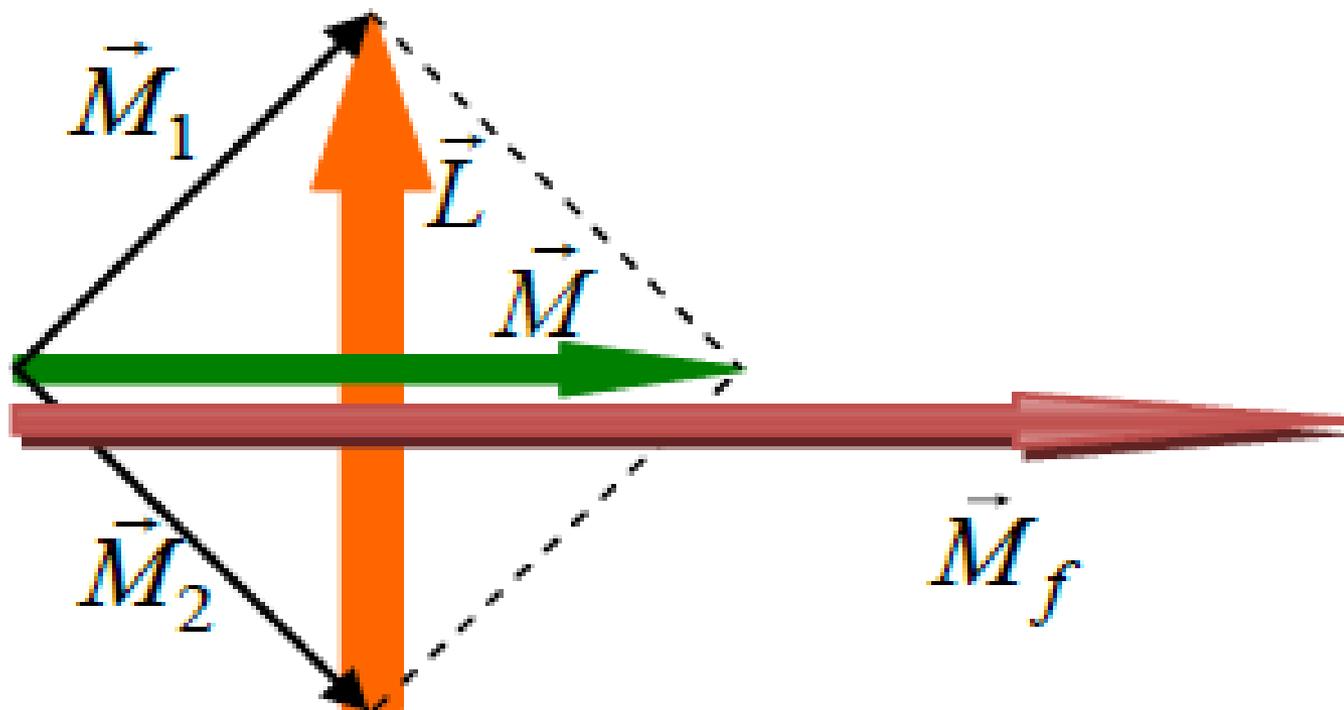


Рис. 7. Спин-флоп ориентация: M_1 , M_2 - намагниченности подрешеток верхней атомной плоскости антиферромагнетика, M – результирующая намагниченность, L – вектор антиферромагнетизма.

Выводы

Перемагничивание слоя ферромагнетика в системе ферромагнетик-мультиферроик, полностью определяется обменным взаимодействием. Электрическое поле приводит к развороту вектора поляризации и связанного с ним вектора антиферромагнетизма в слое мультиферроика, что, в свою очередь, приводит к развороту намагниченности ферромагнитного слоя на 90° за счет обменного взаимодействия на границе раздела ферромагнетик-мультиферроик.

Наличие слабого ферромагнетизма и линейного магнитоэлектрического эффекта не являются необходимыми для реализации магниторезистивной памяти на основе нанослоев мультиферроика с записью электрическим полем.

Минимальный латеральный размер бита, диктуемый суперпарамагнитным пределом составляет **7 нм.**

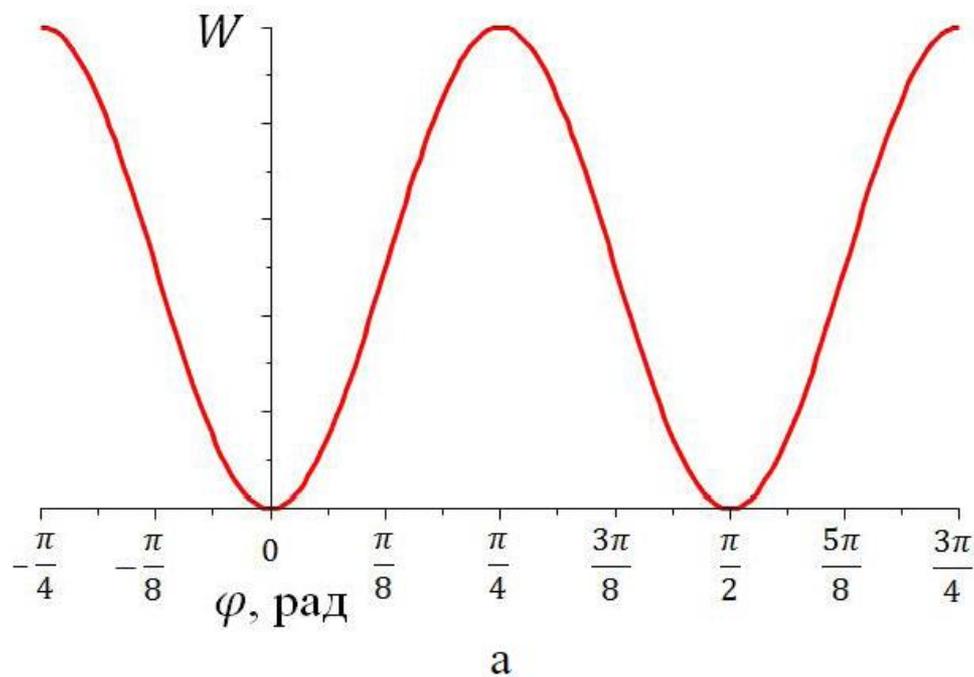
Упругое взаимодействие слоев

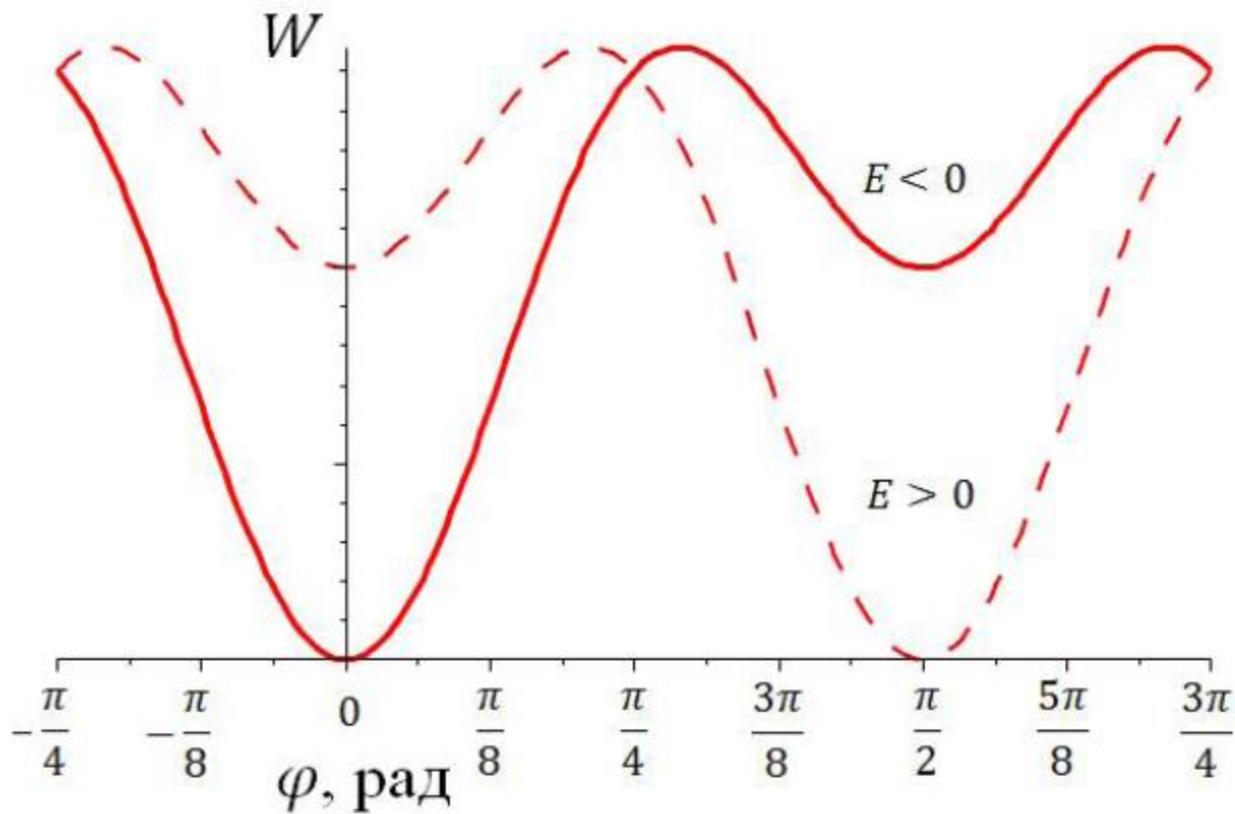
Возможны два случая:

- Переориентация происходит между двумя положениями равновесия, существовавшими в отсутствие взаимодействия с электрочувствительным слоем. Электрочувствительный слой является слоем пьезоэлектрика.
- Направление намагниченности ферромагнитного слоя определяется остаточной деформацией электрочувствительного слоя сегнетоэлектрика-сегнетоэластика.

Случай 1.

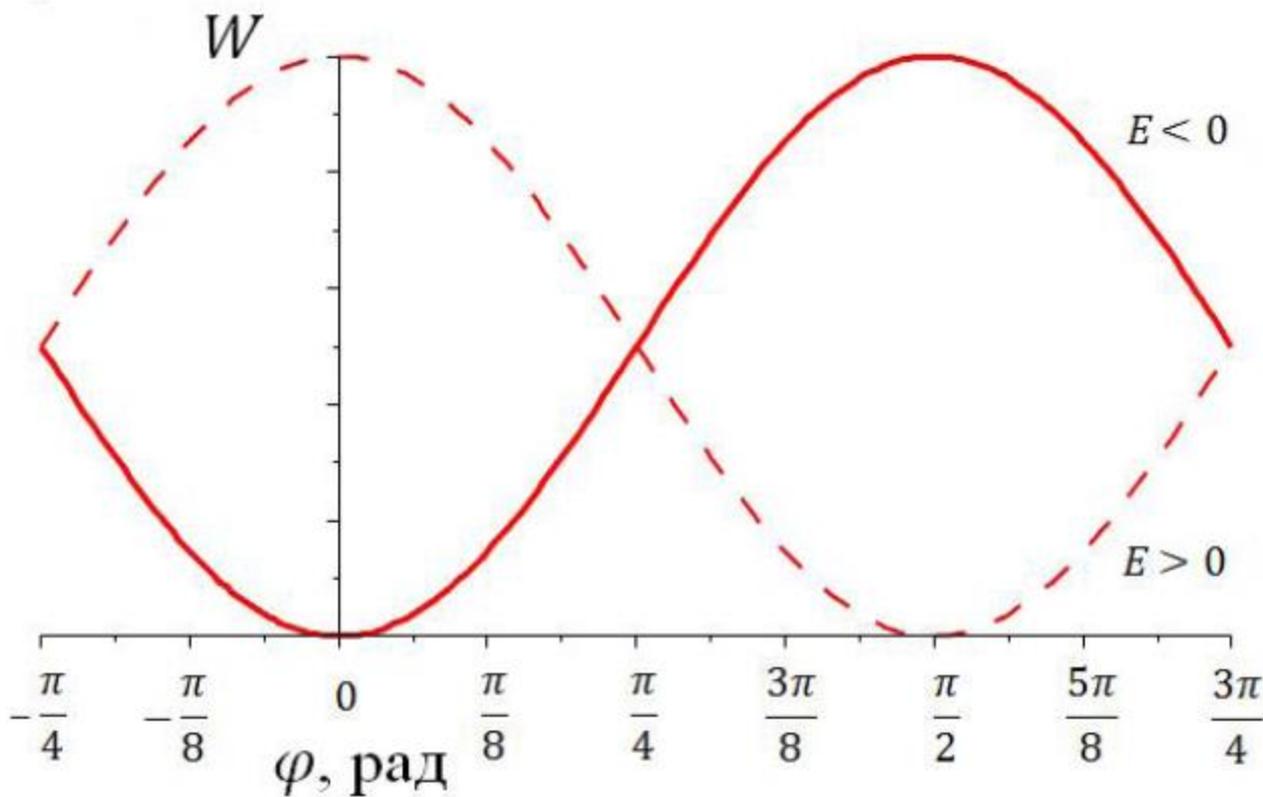
$$W_{me} = B_1(\varepsilon_{11}m_1^2 + \varepsilon_{22}m_2^2 + \varepsilon_{33}m_3^2) + B_2(\varepsilon_{12}m_1m_2 + \varepsilon_{13}m_1m_3 + \\ + \varepsilon_{23}m_2m_3),$$





б

НАУЧНЫЙ СЕМИНАР
«Исследования в области спинтроники и перспективы
создания элементной базы на ее основе»



В

Случай 1.

Недостатком описанной памяти является малое значение константы кубической анизотропии (для железа $K_0=24$ кДж/м³), что приводит, вследствие существования суперпарамагнитного порога, к ограничению снизу на объем переключаемого ферромагнитного слоя. Для случая железа, объем ферромагнитного слоя должен превосходить $2 \cdot 10^4$ нм³. То есть для слоя толщиной 2 нм его размеры в плоскости слоя должны превосходить 100 нм.

Для характерных значений пьезоэлектрических модулей $d_{ijk} \sim 2-4 \cdot 10^{-10}$ Кл/Н и напряженностей электрических полей $E < 1$ МВ/м, получаем относительную деформацию $\varepsilon \sim 0.01-0.03$. Поскольку в случае рассматриваемого механизма наводимая магнитная анизотропия должна превышать собственную анизотропию ферромагнитного слоя (в противном случае система не преодолевает барьера между двумя равновесными направлениями намагниченности, существовавшими в отсутствие взаимодействия с электрочувствительным слоем), то при $B \sim -10$ МДж/м³ получаем ограничение на объемную плотность собственной энергии анизотропии ферромагнитного слоя $K_0 < 1-3$ кДж/м³.

Столь малое значение константы анизотропии увеличивает минимальный объем, необходимый для превышения суперпарамагнитного предела, а вместе с ним и минимальный латеральный размер ячейки.

Вторая проблема, возникающая при создании **MERAM** на основе упругого взаимодействия слоев, связана с тем, что при создании памяти электрочувствительный слой должен быть индивидуален для каждой ячейки, а общая подложка должна быть пассивным элементом. При этом она препятствует деформации электрочувствительного слоя под действием электрического поля.

Исключить указанное действие подложки можно выбором формы электрочувствительного слоя: толщина электрочувствительного слоя должна намного превосходить его латеральный размер (память «на длинной ноге»). При используемых значениях электрического напряжения $\sim 0.1 - 1 \text{ В}$ и полях переключения 10^5 В/м латеральный размер ячейки / оказывается ограниченным сверху величиной порядка сотен нанометров – единицы микрон.

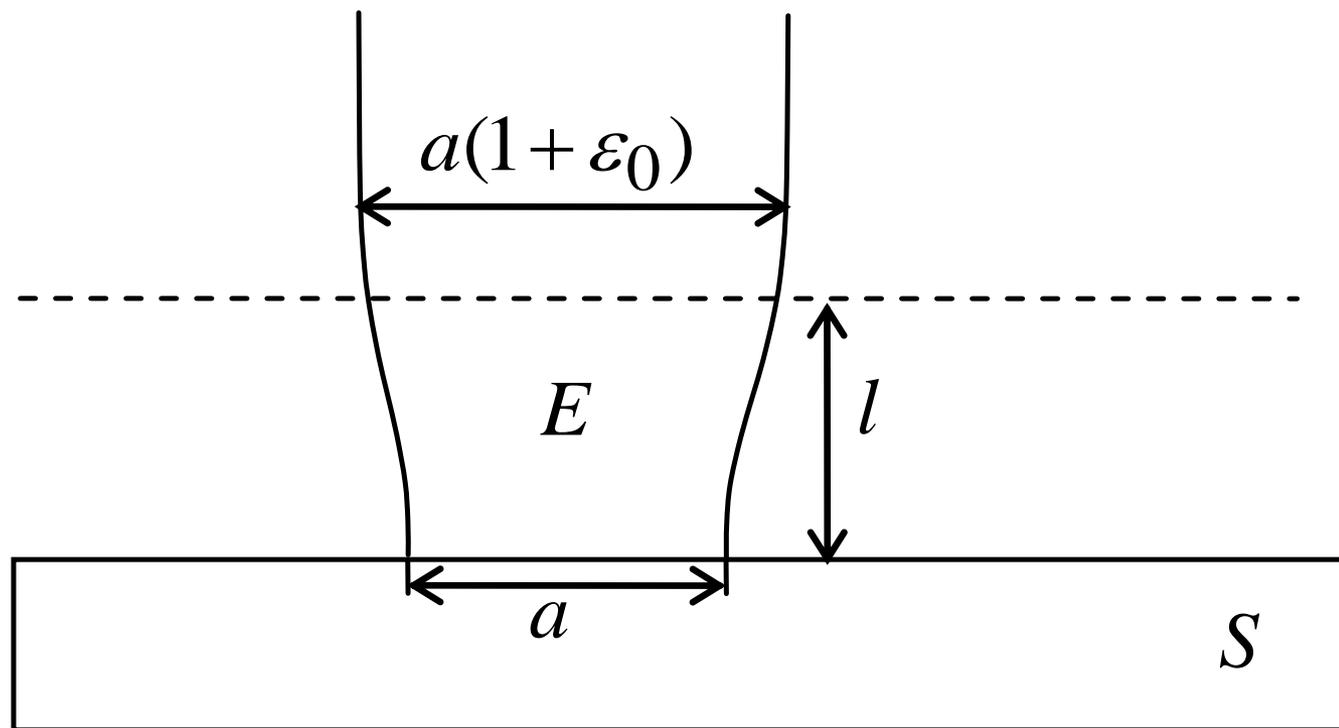


Рис.8. Область деформации электрочувствительного
слоя вблизи подложки.

Случай 2.

Срез (110) электрочувствительного слоя сегнетоэлектрика-сегнетоэластика $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{N}_{2/3})_{0,68}\text{Ti}_{0,32}\text{O}_3$ (PMN-PT). Спонтанная сегнетоэлектрическая поляризация направлена вдоль одной из осей типа [111] ромбоэдрически искаженной перовскитоподобной структуры (восемь возможных направлений).

Приложение электрического поля напряженностью $E < 10^6$ В/м приводит к переполяризации образца.

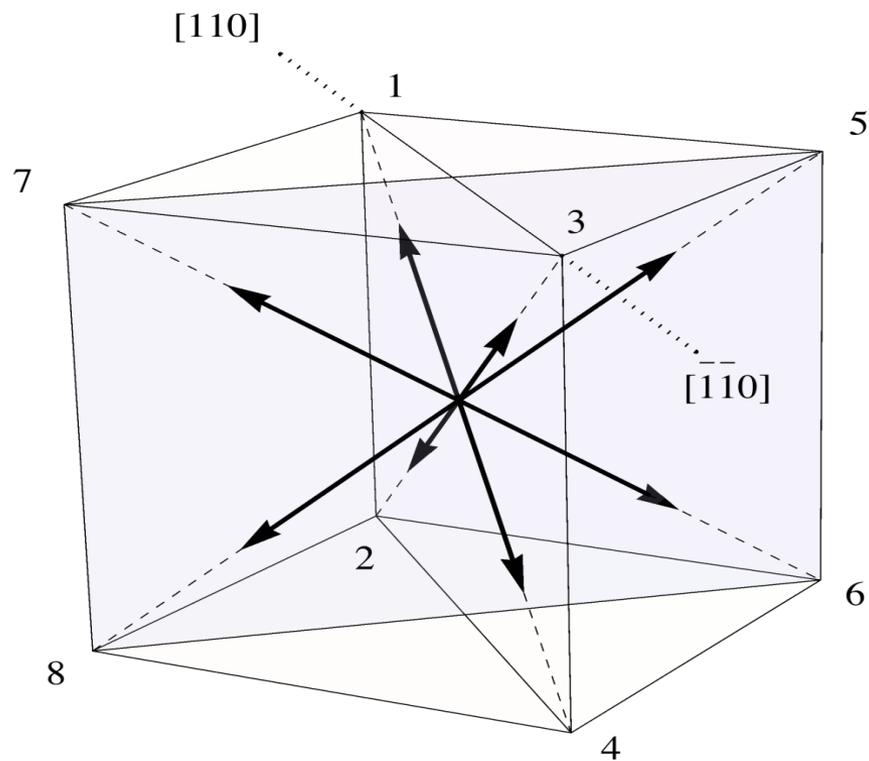


Рис. 9. Возможные направления вектора поляризации в кристалле **PMN-PT**.

Оценим ограничения на латеральные размеры ячейки, накладываемые существованием суперпарамагнитного порога. Исходя из значения ромбоэдрического угла **PMN-PT** $\alpha=89.1^\circ$ легко найти, что при развороте вектора поляризации из положения **1** в положение **5** (рис. 4) деформация сжатия $\varepsilon = -0.08\%$ кубической решетки сменяется деформацией растяжения $\varepsilon = 0.08\%$. Она передается ферромагнитному слою **CoFeB**, наводя в нем вследствие магнитоупругого взаимодействия магнитную анизотропию с объемной плотностью энергии $K=B\varepsilon \sim 10^4$ Дж/м³ (B магнитоупругая константа аморфного **CoFeB** ~ -10 МДж/м³). Это дает для I_{min} величину ~ 100 нм. У терфенола D константа B в 20 раз больше, что дает значение $I_{min} \sim 20$ нм.

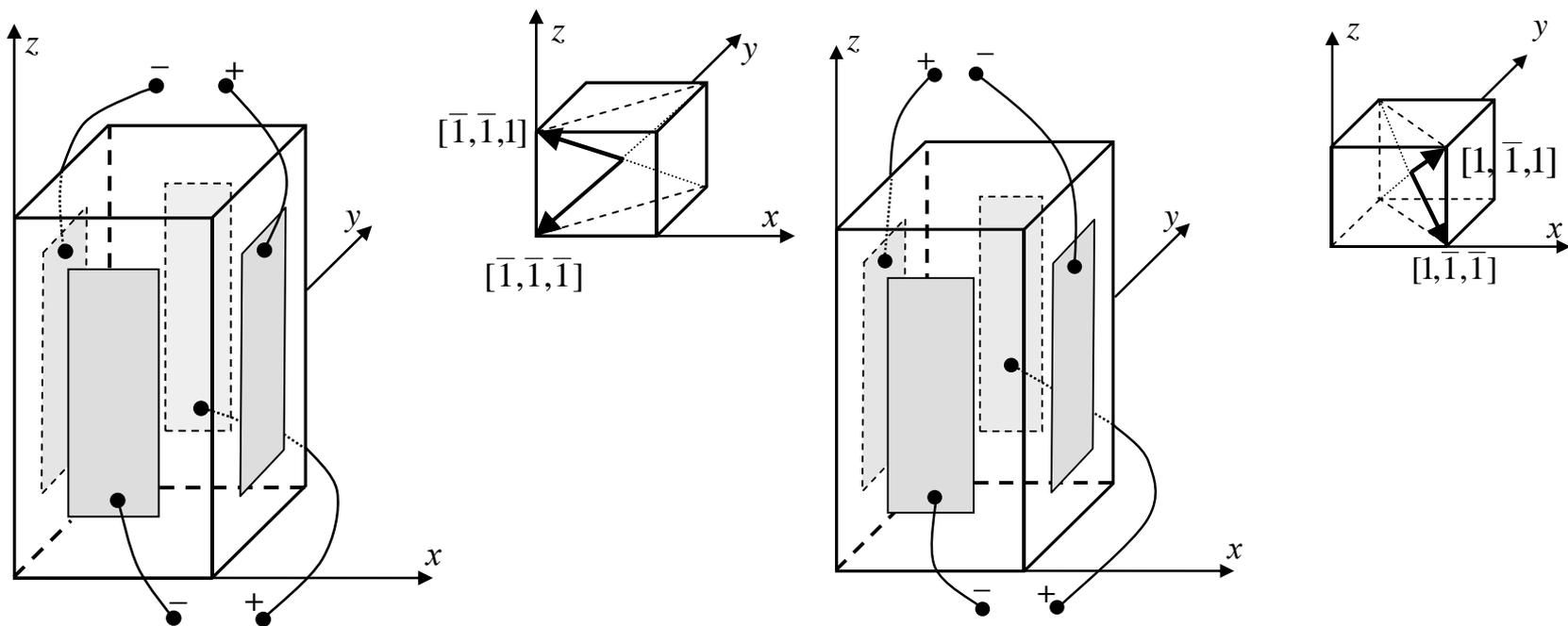


Рис.10. Расположение электродов на электрочувствительном слое. На вставке указано направление спонтанной поляризации.

Выводы

Проведенное рассмотрение видов упругого взаимодействия ферромагнитного и электрочувствительным слоев показывает, что применение в качестве материала электрочувствительного слоя сегнетоэлектрика-сегнетоэластика является наиболее перспективным для создания **MRAM** с записью электрическим полем.

При создании **MRAM**, в которой электрическое поле прикладывается перпендикулярно слою **PMN-PT**, необходимо экспериментально определить характерное число последовательных циклов перехода вектора поляризации в метастабильное состояние между двумя неудачными переключениями, сопровождающимися его срывом в равновесное состояние.

Исследование прототипа памяти на основе слоя сегнетоэлектрика-сегнетоэластика следует проводить не на активной, а на пассивной подложке, создав на ней электрочувствительный слой **PMN-PT** с размерами, соответствующими отдельной ячейке.

СПАСИБО

ЗА

ВНИМАНИЕ

Лекция 8

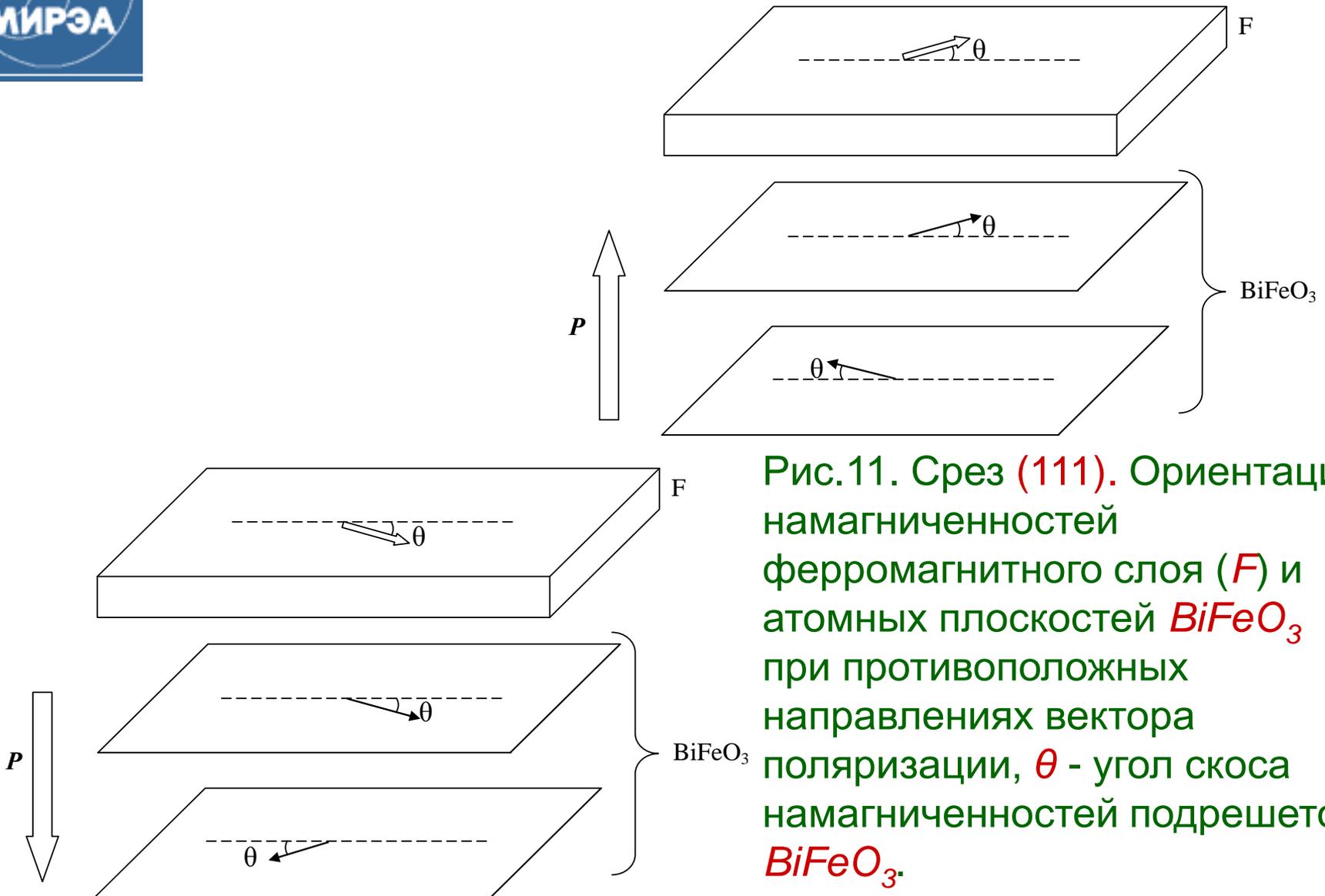


Рис.11. Срез (111). Ориентация намагниченностей ферромагнитного слоя (F) и атомных плоскостей BiFeO_3 при противоположных направлениях вектора поляризации, θ - угол скоса намагниченностей подрешеток BiFeO_3 .



Лекция 8



• Y.-H. Chu, L.W. Martin, M.B. Holcomb, M. Gajek, S.-J. Han, Q. He, N. Balke, C.-H. Yang, D. Lee, W. Hu, Q. Zhan, P.-L. Yang, A. Fraile-Rodriguez, A. Scholl, S.X. Wang, R. Ramesh. *Nature Materials* **7**, 478 (2008).

• J.T. Heron, M. Trassin, K. Ashraf, M. Gajek, Q. He, S.Y. Yang, D.E. Nikonov, Y-H. Chu, S. Salahuddin, R. Ramesh. *Phys. Rev. Lett* **107**, 217202 (2011).



• S.M. Wu, S.A. Cybart, D. Yi, J.M. Parker, R. Ramesh, R.C. Dynes. *Phys. Rev. Lett.* **110**, 067202 (2013).

ЭВОЛЮЦИЯ ВЕКТОРА АНТИФЕРРОМАГНЕТИЗМА МУЛЬТИФЕРРОИКА BiFeO_3 В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ЕГО СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Спин-орбитальное взаимодействие ориентирует вектор антиферромагнетизма перпендикулярно вектору спонтанной поляризации. Вклад Φ_1 данного взаимодействия в энергию Гиббса можно выразить через соответствующий инвариант

$$\Phi_1 = \alpha(\mathbf{p}\mathbf{l})^2, \quad (1)$$

где $\alpha > 0$, а единичные векторы \mathbf{p} и \mathbf{l} задают направления векторов \mathbf{P} и \mathbf{L} соответственно.

Наряду с указанной одноосной анизотропией необходимо учитывать вклад Φ_2 кубической анизотропии в виде

$$\Phi_2 = -\beta(l_x^4 + l_y^4 + l_z^4), \quad (2)$$

где β – константа кубической анизотропии, l_x, l_y, l_z – координаты вектора l .

Вклад магнитоупругого взаимодействия с подложкой в энергию Гиббса записывается в виде

$$\Phi_3 = -\gamma(\mathbf{n}l)^2, \quad (3)$$

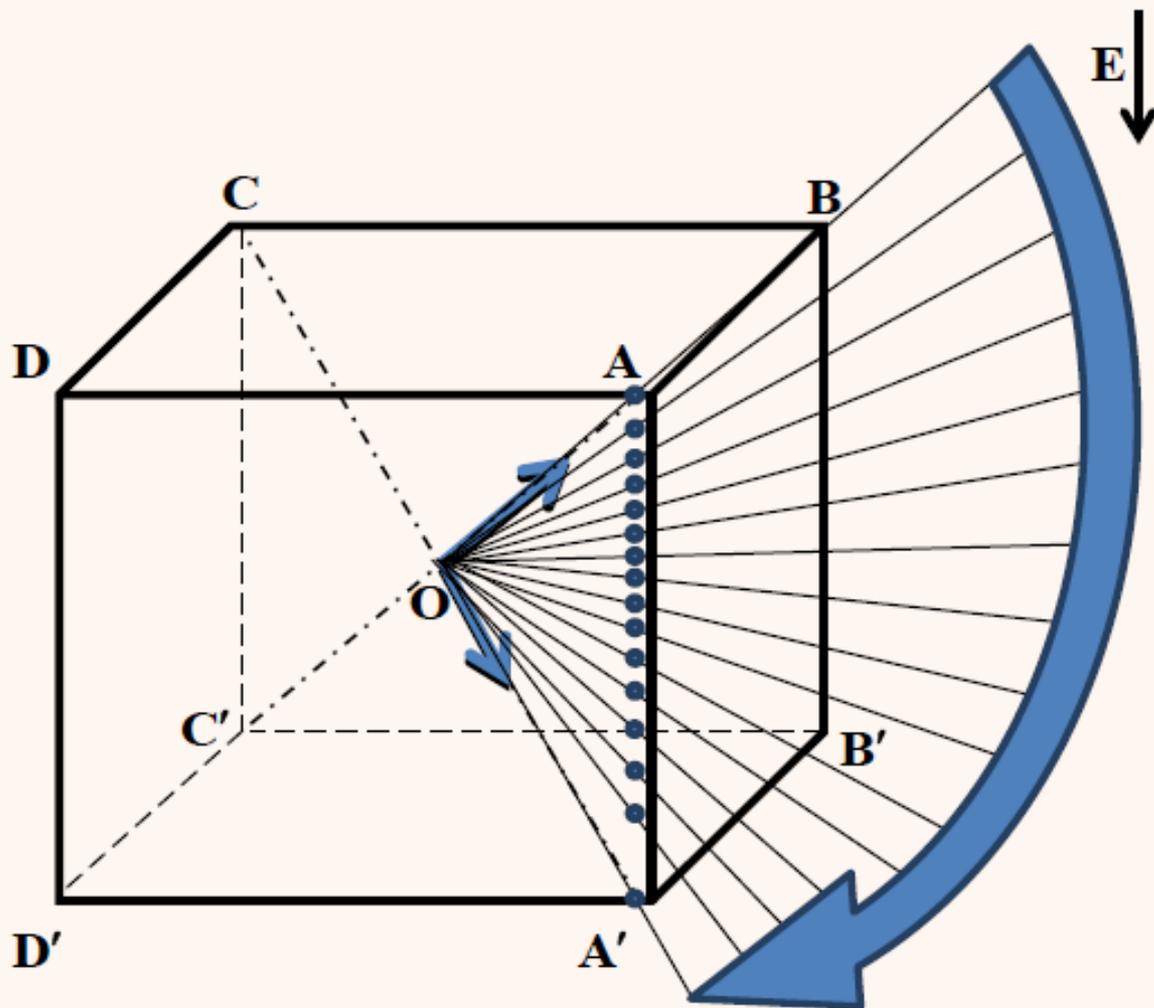
где \mathbf{n} – единичный вектор нормали к плоскости слоя, а константа взаимодействия γ положительна в случае сжимающих и отрицательна в случае растягивающих подложек.

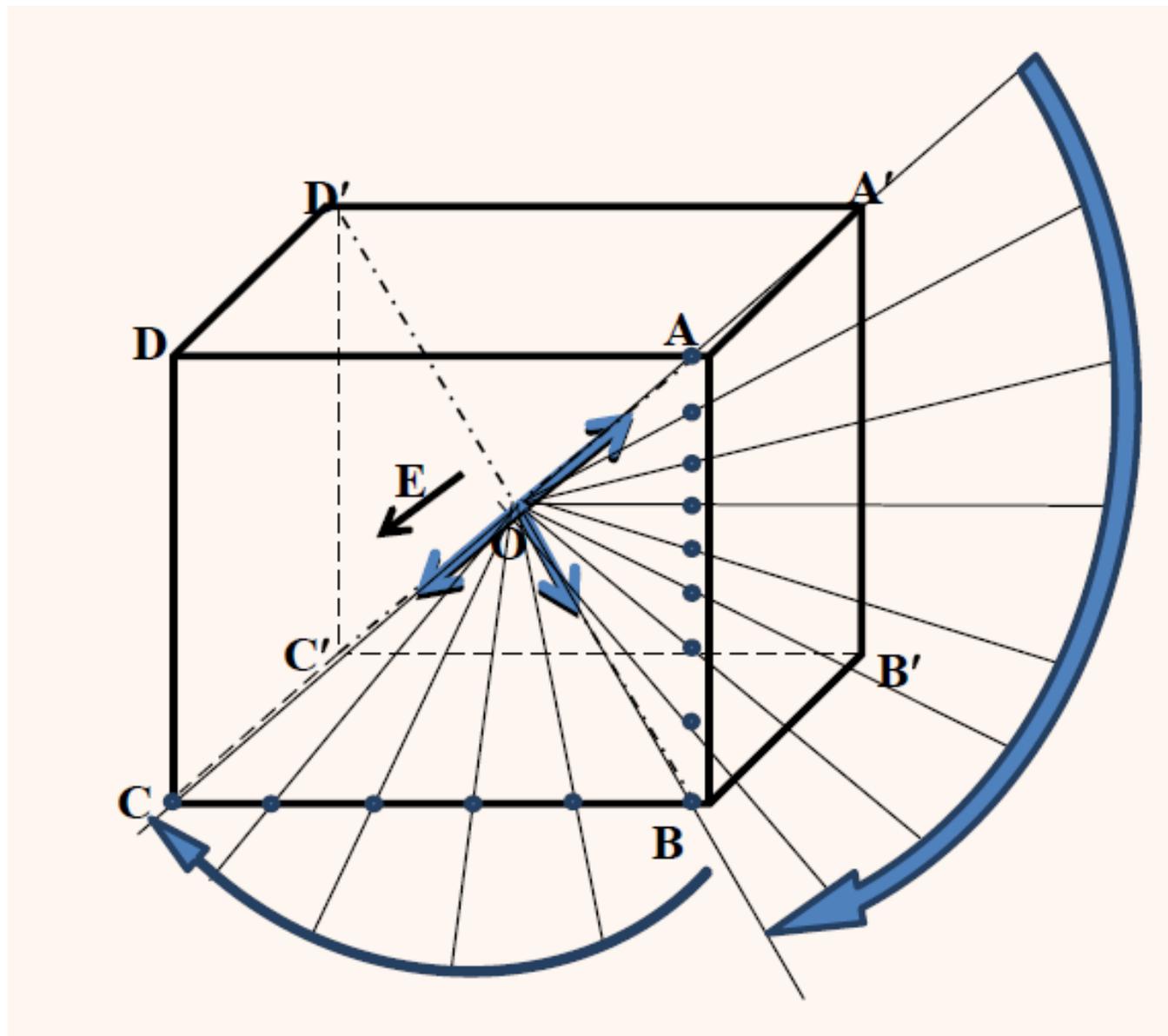
$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3. \quad (4)$$

$$\alpha = 1$$

$$\beta = 0; \pm 0.01$$

$$\gamma = \pm 0.01$$





Срез	Вид деформации	Направление эл. поля	Исходное направление вектора P	Конечное направление вектора P	Исходное направление вектора L	Конечное направление вектора L	Исходное направление вектора M	Конечное направление вектора M
(001)	Сжатие	В плоскости слоя, параллельно $[\bar{1}00]$	$[111]$	$[\bar{1}11]$	$[\bar{1}\bar{1}2]$	$[1\bar{1}2]$	$[1\bar{1}0]$	$[110]$
(001)	Сжатие	В плоскости слоя, параллельно $[\bar{1}\bar{1}0]$	$[111]$	$[\bar{1}\bar{1}1]$	$[\bar{1}\bar{1}2]$	$[112]$	$[1\bar{1}0]$	$[\bar{1}10]$
(001)	Растяжение	Перпендикулярно слою, параллельно $[00\bar{1}]$	$[111]$	$[11\bar{1}]$	$[1\bar{1}0]$	$[1\bar{1}0]$	$[11\bar{2}]$	$[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$
(110)	Растяжение	Перпендикулярно слою, параллельно $[\bar{1}\bar{1}0]$	$[111]$	$[\bar{1}\bar{1}1]$	$[1\bar{1}0]$	$[1\bar{1}0]$	$[11\bar{2}]$	$[112]$
(110)	Растяжение	В плоскости слоя, параллельно $[00\bar{1}]$	$[111]$	$[11\bar{1}]$	$[1\bar{1}0]$	$[1\bar{1}0]$	$[11\bar{2}]$	$[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$

Срез (001)

Прикладывая электрическое поле параллельно ребру и диагонали грани в плоскости упруго сжатого слоя, можно развернуть вектор M , лежащий в плоскости слоя, на 90° и 180°

Приложение поля перпендикулярно слою, как видно из таблицы, оставляет неизменным вектор L , переключает на 180° латеральную составляющую вектора M , но оставляет неизменной перпендикулярную слою компоненту этого вектора. Последний недостаток компенсируется возможностью использования перпендикулярного слою напряжения.

Срез (110)

В случае упруго растянутого слоя приложение поля в плоскости слоя вдоль направления $[00 \bar{1}]$ изменяет знак перпендикулярной составляющей вектора \mathbf{M} , оставляя латеральную составляющую неизменной. Такая конфигурация «срез-деформация-направление поля» перспективна для создания памяти с перпендикулярной записью, то есть с намагниченностями ферромагнитных слоев туннельного соединения, перпендикулярными слоям. Если же поле приложено перпендикулярно слою, то, как и в случае среза (001), при неизменных векторе \mathbf{L} и перпендикулярной составляющей вектора \mathbf{M} , происходит разворот на 180° латеральной составляющей вектора \mathbf{M} .

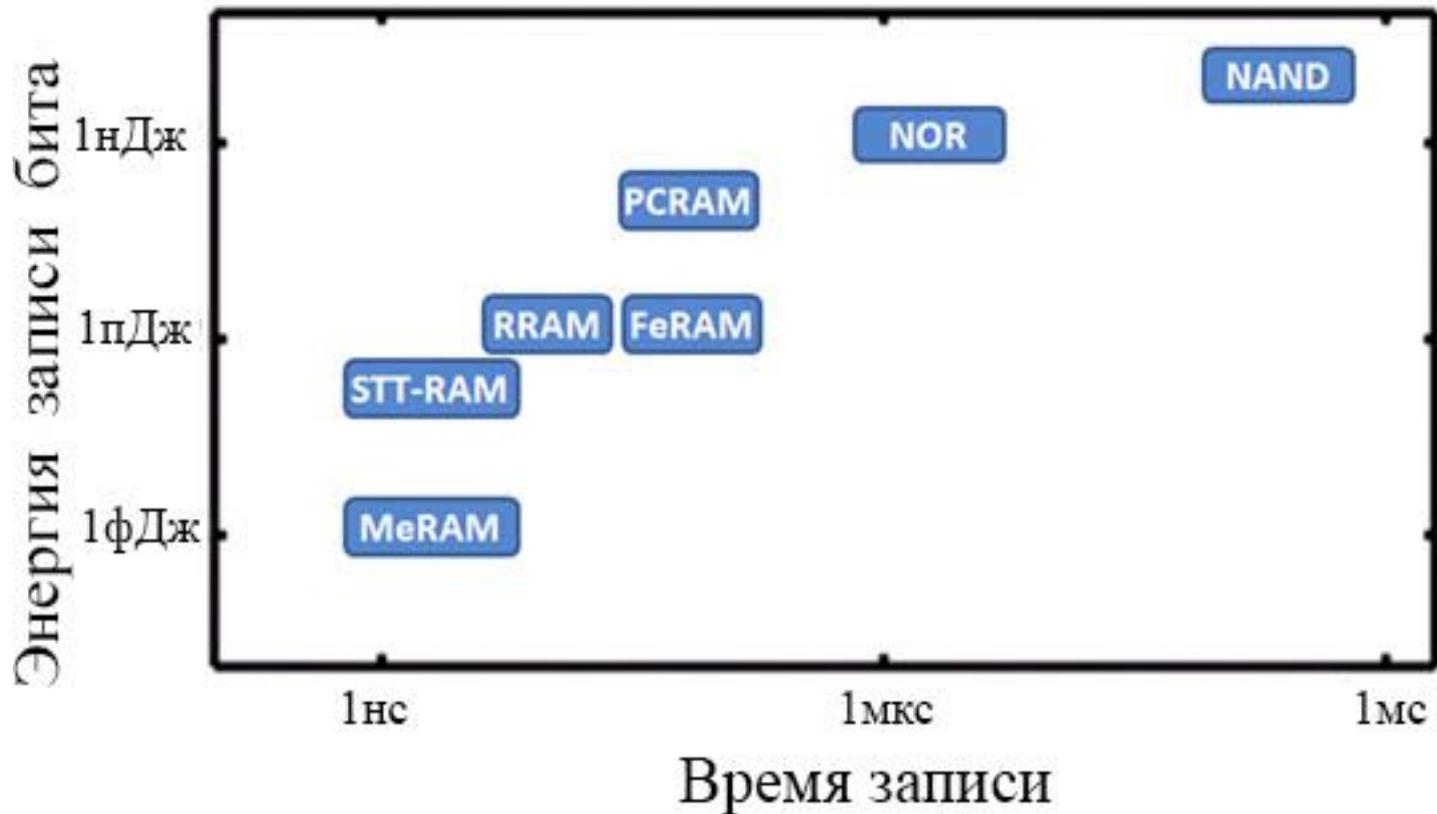


Рис. 3. Скорость и энергоэффективность существующих (NAND и NOR видов флеш-памяти) и появляющихся (MeRAM, STT-MRAM, память на фазовых-переходах PCRAM, ферроэлектрическая FeRAM и резистивная память RRAM) энергонезависимых технологий памяти.