

В поисках «вечного электромагнита» (первоначальный вариант)

Природа магнетизма и его связь с электричеством – проблема столь же древняя как сама физика. Способности магнита притягивать предметы посвящали свои сочинения мыслители античности, практичные китайцы изобрели компас, но по-настоящему приручить магнетизм удалось только в индустриальный 19-век, когда была понята взаимосвязь магнитного поля с электрическим током: появились мощные электромагниты, позволявшие включать и выключать магнитное поле по своему желанию, что нашло использование в подъемных кранах, магнитных сепараторах для обогащения руд и очистки кормов, электродвигателях и многих других устройствах. Конечно, в электромагнитах есть свои недостатки – при протекании тока через катушки неизбежно теряется энергия. И здесь взор ученых неизменно обращался к постоянным магнитам, не требующих для создания магнитного поля никакого источника энергии. Их свойства объясняли по аналогии с электромагнитами некими «молекулярными» токами, текущими внутри вещества в каждой молекуле. Хотя природа молекулярных токов долгое время оставалась непонятой, сама возможность вечного движения внутри вещества казалась чрезвычайно заманчивой, ведь если бы удалось с помощью электрического поля воздействовать на молекулярные магниты, то управление магнитным полем осуществлялось бы без потерь энергии. В 1984 году французский физик Пьер Кюри высказал мысль, что существование таких молекул и веществ, которые бы намагничивались под действием электрического поля, не противоречит известным законам. Свое решение подсказывали и практики: американский электронный инженер Б. Теллеген предложил создать магнитоэлектрическую среду в виде взвеси, в которой бы плавали частицы, представлявшие собой магнитоики, сцепленные с кусочками электрета. Впрочем, даже через полвека после работы Кюри материалы с такими свойствами, для которых уже подыскивали название «магнитоэлектрики», ни найдены, ни созданы не были.

					
П. Кюри ()	Л.Д.Ландау (1908-1968) (справа) и Е.М. Лифшиц (1915- 1985)	И.Е. Дзялошинский (слева) и Д.Н. Астров	В.Н. Фолен	Дж. Радо	Г.А. Смоленский (1910-1986)

Магнитоэлектрические кристаллы: два в одном

Дело сдвинулось с мертвой точки только когда Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц, работая над своим знаменитым учебником теоретической физики, сформулировали необходимые условия существования магнитоэлектрического эффекта в веществе, тем самым существенно сузив круг поиска: магнитоэлектрики стоило искать не среди обычных магнитов, а в классе антиферромагнетиков, то есть кристаллов, состоящих из противоположно намагниченных подрешеток (рис. 1).

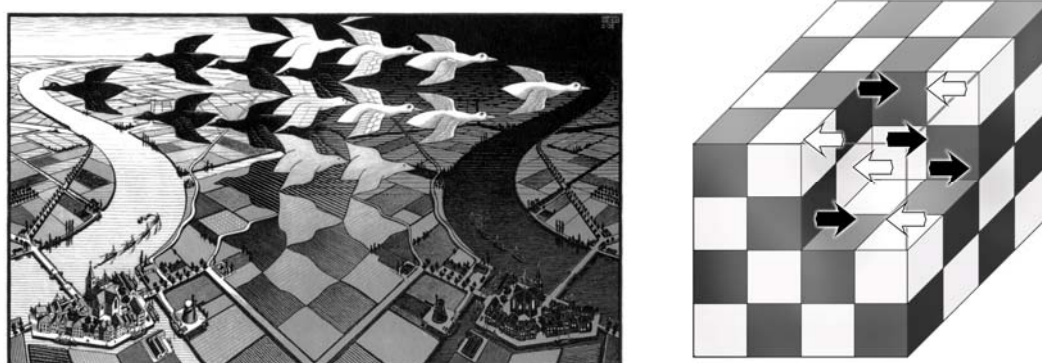


Рис. 1 Антиферромагнетизм а) «День и ночь»: идею антиферромагнитного упорядочения предвосхитили рисунки голландского графика Мориса Эшера б) антиферромагнитное упорядочение шахматного типа: в соседних узлах кристаллической ячейки магнитные моменты ионов направлены противоположно.

Спустя некоторое время И.Е. Дзялошинский, работавший в группе Ландау, указал на конкретное соединение Cr_2O_3 и через год в 1960 году магнитоэлектрический эффект в этом материале действительно был обнаружен Д.Н. Астровым, зафиксировавшим намагниченность, наведенную электрическим полем. Любопытно, что еще за несколько лет до того американские ученые В. Фолен и Г. Радо (Folen V.J., Rado G.T.) тщетно пытались обнаружить магнитоэлектрические свойства у различных веществ, измеряя электрическую поляризацию в магнитном поле. Поиски эти были безрезультатными, поскольку они ничего не знали о работах Ландау, Лифшица и Дзялошинского (их английские версии книг и статей выходили с некоторой задержкой), и руководствовались интуитивными соображениями. Услышав об открытии Астрова, они тут же провели измерения на Cr_2O_3 и продемонстрировали обратный эффект - электрическую поляризацию, наводимую магнитным полем. Эффект, надо сказать, был небольшим, но все же измеримым - магнитное поле порядка магнитного поля земли создавало электрическое поле 20 мВ/см. Учитывая, что размеры образцов составляли миллиметры

(не так-то просто вырастить большой кристалл), реально измеряемые напряжения составляли единицы милливольт.

Примерно в это же время в ленинградском Физико-техническом Институте в группе под руководством Г.А. Смоленского велся поиск магнитных сегнетоэлектриков, т.е. веществ, в которых бы даже в отсутствии внешних полей наблюдалась не только намагниченность, но и электрическая поляризация. Поскольку стратегия поиска предполагала замещение магнитными элементами ионов в ранее известных сегнетоэлектриках, то первый синтезированный «сегнетомангнетик» (или «мультиферроик», как теперь принято называть этот класс материалов, подробнее о терминах см. Дополнение) получился «сложносочиненным»: в виде твердого раствора $(1-x)\text{Pb}(\text{Fe}_{2/3}\text{W}_{1/3})\text{O}_3 - x\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$. Однако вскоре обнаружилось и более простое соединение, наибольшее распространение среди которых получил феррит висмута BiFeO_3 , проявляющий свои магнитоэлектрические свойства при комнатной температуре.

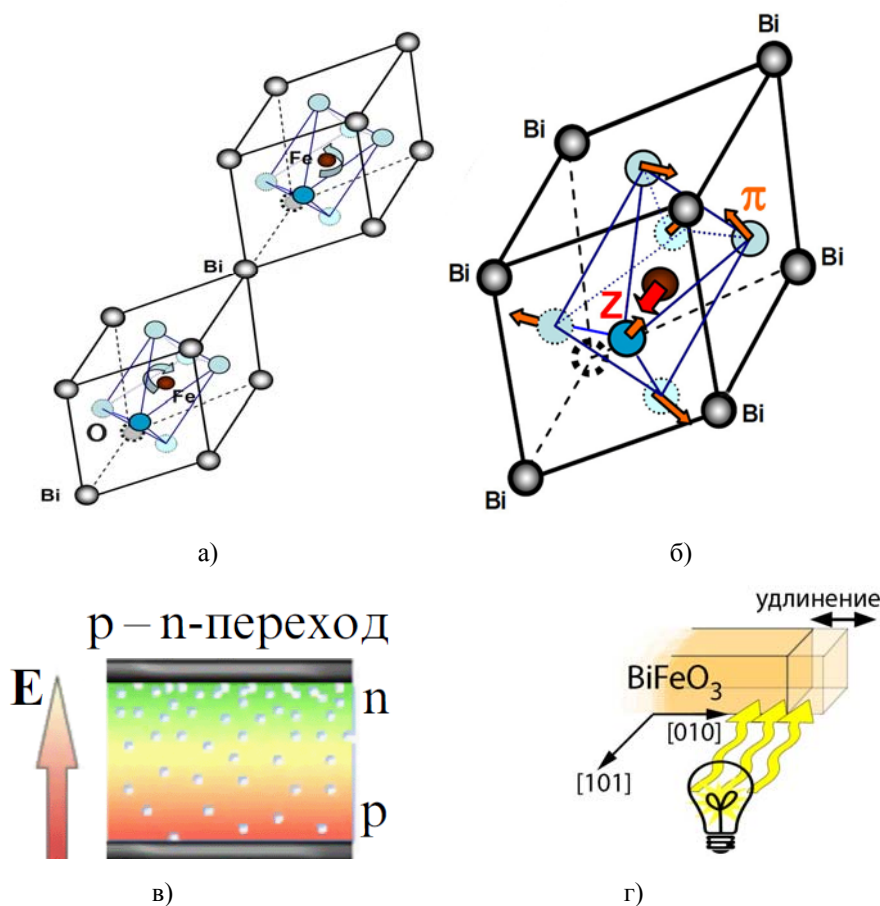


Рис. 2 Феррит висмута – излюбленный объект исследования ученых, занимающихся магнитоэлектричеством. а) перовскитная структура: в центрах кубов находятся ионы железа, в вершинах – ионы висмута, в центрах граней – ионы кислорода б) образование р-п перехода в результате перемещения кислородных вакансий в феррите висмута в) электрострикция в феррите висмута – растяжение образца под действием светового излучения

Феррит висмута стал любимым объектом исследователей: в нем сочетаются простое внутреннее строение и богатство эффектов. Он проявляет свойства сегнетоэлектрика (с электрической поляризацией превосходящей все известные вещества), магнита (хотя и довольно слабого), магнитострикционного материала (т.е. вещества, деформирующегося под действием магнитного поля), магнитоэлектрика и полупроводника (например, под действием света в нем возникает электрический ток, что можно использовать в солнечных батареях). Кристаллическая структура феррита висмута, как и большинства веществ с общей химической формулой ABO_3 подобно структуре перовскита (подробнее о происхождении названия, см. приложение): катионы элемента А находятся в вершинах кубической решетки, анионы кислорода расположены в центрах граней, образуя октаэдры, а катионы вещества В занимают центры кубов (рис. 2). Справедливости ради надо отметить, что большинству своих свойств феррит висмута обязан своими «неправильностями», именно отличиями от идеальной перовскитной структуры. Так вращение кислородных октаэдров (рис. 2а) приводит к тому, что магнитные моменты двух антиферромагнитных подрешетки не строго противоположны (образуют угол чуть меньший 180 градусов), а, значит, не полностью компенсируют друг друга. Электрические и магнитоэлектрические свойства обусловлены смещением ионов вдоль главной диагонали куба и искажениями октаэдра (рис. 2 б вставка). Необычные полупроводниковые свойства феррита висмута – служить перестраиваемым с помощью электрического поля полупроводниковым диодом возникает из-за наличия еще одного вида дефектов – кислородных вакансий, которые ведут себя как примеси, не только изменяющие тип проводимости вещества, но и способные перемещаться под действием электрического поля. В результате под действием приложенного электрического поля в однородном материале возникает р-п переход, обладающий выпрямляющими свойствами по отношению к электрическому току.

Наконец, феррит висмута является единственным материалом в котором наблюдается меняющееся в магнитном поле растяжение вещества под действием электрического света (рис. 2 в). Под действием излучения от стоваттной лампы относительное удлинение в кристаллографическом направлении $[010]$ составляет величину порядка 10^{-5}

Надо сказать что таких «высокотемпературных» магнитоэлектриков как феррит висмута совсем немного, едва ли больше десятка, да и те имеют существенный недостаток – заметную проводимость при комнатной температуре, что сводит на нет главное достоинство магнитоэлектрического способа получения магнитного поля – отсутствие электрических токов. Вот почему, отчаявшись найти подходящие вещества в

природе, ученые принялись за конструирование искусственных магнитоэлектрических сред.

Композиты – искусственные магнитоэлектрики

Как гласит народная мудрость, «если скрестить ежа с ужом, то получится метр колючей проволоки», так и для создания магнитоэлектрического материала нужно «скрестить» вещество, реагирующее на электрическое поле, с магнитным веществом, т.е. создать композитный материал.

Первые попытки создать магнитоэлектрические композиты были предприняты в 70-х годах прошлого столетия. Это были смеси двух порошков: первый, магнестрикционный, его частички деформировались под действием магнитного поля; второй представлял собой *пьезокерамику*, электрически поляризующуюся при деформации. Если такую смесь помещали в магнитное поле, то частицы магнестрикционного материала, деформируясь, механически воздействовали на соседние частицы пьезоэлектрического материала, а те электрически поляризовались, порождая разность потенциалов на границах композита. Получалось своего рода произведение эффектов:

«магнито-упругий» × «упруго-электрический» = магнитоэлектрический

Идея была замечательная, но качество таких композитов было невысоким, также как и величина наблюдавшихся в них эффектов. Это происходило потому, что невозможно было надежно контролировать химический состав и микроструктуру таких *объемных композитов*: вещества перемешивались, иногда образуя комки и сгустки, как в манной каше. В результате величины эффектов менялись от образца к образцу, а слияние частичек магнестрикционного материала в проводящие каналы (рис.3 а) приводило к «короткому замыканию» образца, сводя на нет получавшийся на нем электрический сигнал.

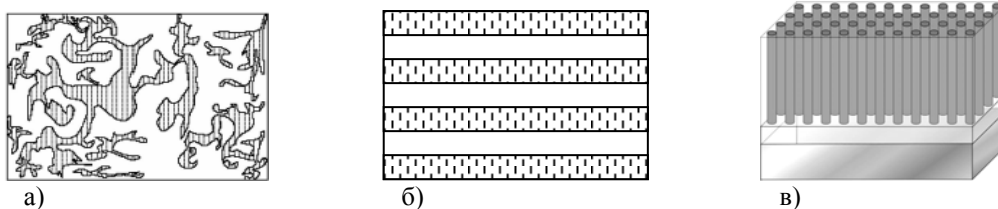


Рис 3. Композитные материалы а) объемные б) слоистые в) столбчатые

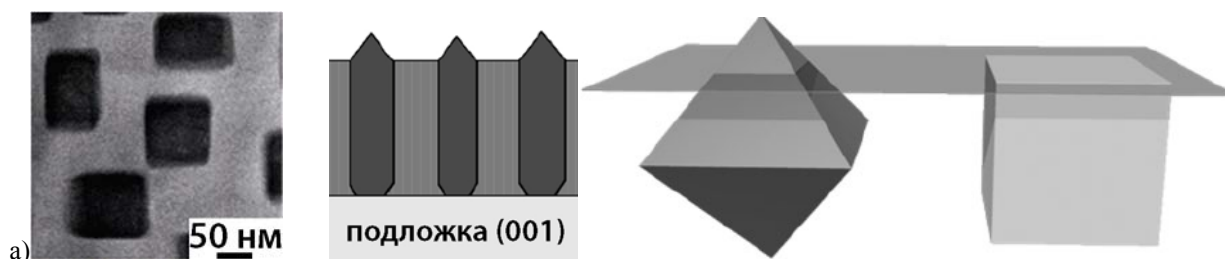
Неудача с первыми композитами привела исследователей к идее *слоистых композитов*, которые состояли из чередующихся слоев магнестрикционного материала и пьезоэлектрического (рис. 3 б), склеенных вместе (в первых опытах для этой цели использовался обыкновенный эпоксидный клей, которым чинят обувь). Такое четкое

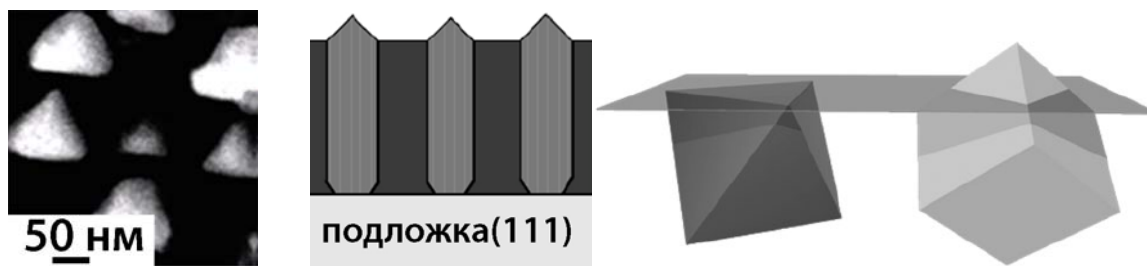
разделение слоев позволило лучше контролировать химический состав (слои готовятся отдельно), также исключалась возможность образования проводящих каналов в вертикальном направлении. Получившиеся значения магнитоэлектрического эффекта превосходили все ожидания: магнитное поле порядка земного создавало в материале электрическое поле в 50 раз большее, чем в хромите. Удавалось даже мерить магнитные поля в сто тысяч раз меньшие, такие создает наше сердце, перегоняя кровь по сосудам. У нас в стране магнитоэлектрическими композитами успешно занимаются группы Ю.К. Фетисова из Института Информатики МИРЭА в Москве и М.И. Бичурина из Великого Новгорода.

Нанотехнологический век диктует свои стандарты: клей на эпоксидной смоле, конечно, хорош, но лучше, если структуры будут расти сами, осаждаясь атом за атомом на подложке (такой рост называется эпитаксиальным). Первые попытки создать такие структуры были предприняты в 1994 году, но они дали обескураживающие результаты: величины магнитоэлектрических эффектов были незначительны в сравнении с многослойными структурами, приготовленными с помощью старой доброй эпоксидки. Причиной тому служило жесткое сцепление слоев с подложкой, на которую осаждалась пленка, что делало невозможными деформации в плоскости (а значит, и деформации в перпендикулярном направлении, напрямую связанные с ними).

Решение этой проблемы было найдено спустя десять лет с изготовлением *столбчатых наноструктур*, в которых связь с подложкой уже не препятствовала растяжению/сжатию столбцов в вертикальном направлении (рис. 3 в). Самое интересное, что эти столбики не нужно создавать искусственно, они образуются сами при одновременном осаждении на подложку двух веществ: магнитострикционного (например, шпинели CoFe_2O_4) и пьезоэлектрического материала (например, перовскиты титанат бария BaTiO_3 или феррит висмута BiFeO_3). Как правило, одно из них не смачивает подложку, собираясь в капли, которые потом вырастают в столбики, а другое – смачивает подложку и становится *матрицей*, которой эти столбики окружены со всех сторон.

Замечательно, что выбор ориентации подложки позволяет выращивать как магнитострикционные столбики в пьезоэлектрической матрице, так и пьезоэлектрические столбики в магнитострикционной матрице (рис.4).





б)
Рис. 4 Зависимость строения нанокompозита от кристаллографической ориентации плоскости подложки а) подложка с ориентацией (001) б) подложка типа (111).

Что же вынуждает две фазы осаждаться таким образом? Оказывается, то же самое явление, которое заставляет капельку воды расплываться на чистом стекле и скатываться в шарик на поверхности, натертой воском – поверхностное натяжение. Математически условие смачивания выражается в балансе поверхностных энергий:

$$\gamma_{12} + \gamma_2 < \gamma_1,$$

где γ_1 – поверхностная энергия подложки, γ_2 – поверхностная энергия напыляемой среды, γ_{12} – энергия границы раздела двух фаз. Параметр γ_2 сильно отличается для различных кристаллографических ориентаций. Для перовскитов титаната бария и феррита висмута поверхностью с наименьшей энергией является плоскость (001), соответствующая грани куба (рис. 4 а). Магнитные шпинели же, напротив, имеют наименьшую поверхностную энергию в плоскостях (111), что соответствует граням октаэдра (рис. 4 б). В результате вещество перовскита смачивает поверхность, если подложка ориентирована в направлении (001) – пьезоэлектрическая фаза в этом случае является матрицей, в которой вырастают магнитострикционные столбики, в случае же подложки (111) все происходит наоборот: внутри магнитострикционной матрицы образуется столбчатая структура из пьезоэлектрика. Эти простые соображения позволяют осуществлять элементарный дизайн наноструктур.

Дополнительные возможности в создании функциональных материалов возникают, когда характерные размеры наноструктур составляют несколько межатомных расстояний. В этом случае фазы композита влияют на внутреннее строение и свойства друг друга. Так чередующиеся слои антиферромагнетиков LaCoO_3 и LaFeO_3 демонстрируют ферромагнитные свойства, а чередование диэлектрических слоев SrTiO_3 и титаната бария BaTiO_3 приводит к резкому усилению сегнетоэлектрических свойств материала. Если же слои титаната бария перемежать магнитным материалом с похожей кристаллической структурой, например манганита лантана, с замещением кальцием $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ то получается искусственная магнитоэлектрическая среда: взаимные искажения, которым благодаря близкому соседству подвергаются кристаллические структуры двух материалов, приводят к взаимодействию электрической и магнитной подсистем. Таким

образом, современные достижения в области материаловедения позволяют не только создавать наноструктурированные материалы с наперед заданными свойствами и строением, но и осуществлять структурную инженерию на атомном уровне, изменяя сами свойства веществ-компонентов.

Обратно к истокам

А как же первоначальные идеи Кюри и Теллегена? К ним вернулись лишь в наше время. Идея Кюри о магнитоэлектрических молекулах нашла свое выражение в предложении ученых из ИОФРАН А.И. Поповым, Д.И. Плоховым и А.К. Звездиным использовать в качестве магнитоэлектрических молекул органические молекулярные нанокластеры Du_3 , в которых магнитными атомами являются три атома диспрозия, образующие правильный треугольник (рис. 5 а).

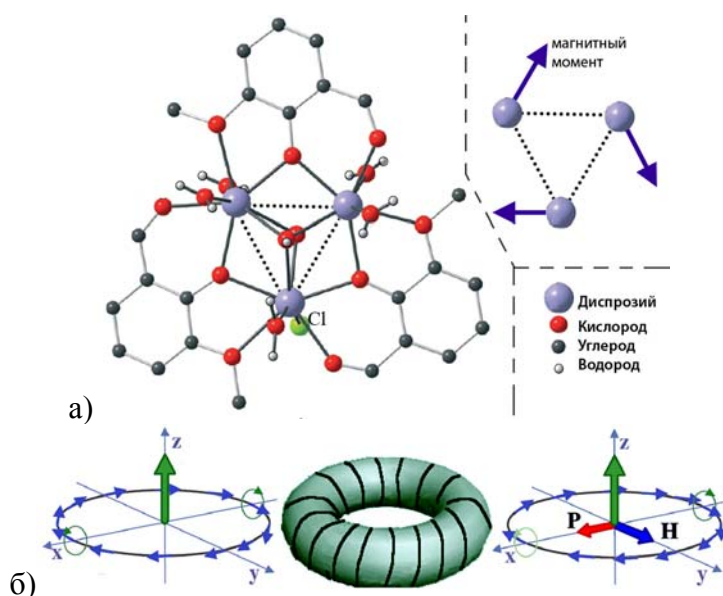
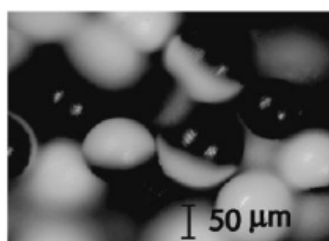


Рис. 5 а) Органический молекулярный нанокластер на основе редкоземельных ионов и взаимная ориентация магнитных моментов катионов диспрозия. При тороидном упорядочении магнитных моментов (рис. 5 б) во внешнем магнитном поле \mathbf{H} помимо намагниченности наводится электрическая поляризация \mathbf{P} . Посередине показан тороидальный электромагнит.

Состоянием молекулы с наименьшей энергией (основным состоянием) является конфигурация, в которой магнитные моменты ионов диспрозия ориентированы параллельно противоположной стороне треугольника, указывая общее направление по часовой стрелке (рис. 5 а). Если бы магнитных ионов было больше, они бы образовали «карусель» из магнитных моментов (рис. 5 б). Такое магнитное упорядочение также называют «тороидным», поскольку круговой электромагнит можно создать, намотав провод на магнитный сердечник в форме бублика (или, на математическом языке, в форме

тора). Структуры и материалы с тороидным упорядочением * обладают магнитоэлектрическим эффектом. Действительно, приложение магнитного поля к конфигурации из магнитных моментов, равномерно расположенных по кругу, вызывает перераспределение магнитных моментов: число ионов, у которых магнитные моменты направлены по магнитному полю, возрастает. Смещение магнитных ионов влечет за собой перераспределение зарядов, так что возникает электрическая поляризация. Здесь стоит отметить, что с равной вероятностью реализуется основное состояние молекулы, в котором магнитные моменты крутятся против часовой стрелки, и для него магнитоэлектрический эффект будет противоположным, так что возникает отдельная проблема, как получать тороидные структуры с одним направлением вращения магнитных моментов.

Также в последние годы с появлением технологии, используемой в электронных книгах, удалось реализовать идею Теллегена о композите, состоящем из магнитоэлектрических частицах, вращающихся в жидкости. Ученые из Гарварда А. Гош, Н.К. Шеридон совместно с П. Фишером из исследовательской лаборатории фирмы Ксерокс и использовали для этого первую модель электронных чернил, называемую гирикон (от греческого «вращающееся изображение»). Гирикон представлял собой полимерную среду, в которую были внедрены двуцветные сферические частицы из полиэтилена, свободно вращающиеся внутри полостей с жидкостью (рис.6). Две полусферы частицы отличаются не только цветом, но и электрическим зарядом (собственно, это свойство черного порошка используется в копирующих аппаратах, сделавших фирму Ксерокс всемирно известной) благодаря чему темная сторона сферы заряжена положительно. Это позволяет ориентировать частицы с помощью электрического поля. Именно так на белом листе электронной бумаги появляются черные буквы – частички поворачиваются другой стороной.



а)



б)

Рис. 6 а) микрофотография гирикона: полимера с внедренными, черно-белыми сферическими частицами б) схематическое изображение магнитоэлектрического композита на основе гирикона: частицы-диполи свободно вращаются в микрополостях с жидкостью. +/- электрические, S,N – магнитные полюса.

* Их, следуя традиции обозначать любое упорядочение словом «ферро» (см. Дополнение), называют «ферротороиками»

Если ввести в материал частиц магнитные примеси, то среда приобретает эффективные магнитоэлектрические свойства: теперь подачей электрического напряжения можно было управлять намагниченностью гирикона, не расходуя энергию на электрические токи. К сожалению, частицы очень неповоротливы: на вращение уходит время порядка секунды, так что о быстродействующих устройствах на гириконе говорить не приходится. В этом смысле более удачной оказалась идея «омагнитить» не электронную бумагу, а главную составляющую другого типа дисплеев – жидкие кристаллы.

Жидкие кристаллы – название само по себе парадоксальное. Они совмещают в себе упорядочение, характерное для твердых тел, с возможностью легко изменять форму, присущую жидкостям. К примеру, в жидких кристаллах нематиках (от греческого слова «нить») продолговатые молекулы располагаются вдоль одного направления как в кристалле, но имеют свободу перемещения как в жидкости (рис. 7 а). Жидкокристаллические мониторы работают благодаря свойству молекул нематика поляризоваться в электрическом поле и ориентироваться вдоль него (рис 7 б), при этом меняется цвет жидкокристаллической ячейки (в простейшей версии жидкокристаллических дисплеев с серебристого на черный). А что если примешать к жидкому кристаллу магнитные наностержни? При этом стержни ориентировались вдоль направления молекул жидкого кристалла и поворачивались вместе с ними (рис. 7). Таким образом, удалось получить магнитный материал, управляемый с помощью электрического поля. Причем магнитный жидкий кристалл намного быстрее откликался на изменение электрического поля, чем частицы гирикона – частота переключения составляла килоггерцы.

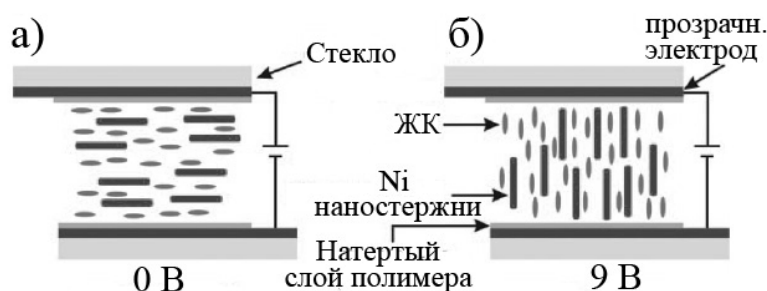


Рис. 7. Жидкий кристалл с магнитными включениями в виде наностержней. а) ориентация молекул жидкого кристалла и наностержней в отсутствие поля б) ориентация молекул и наностержней при включении электрического поля

Однако гирикон и жидкокристаллическая ячейка ни по своим размерам, ни по быстродействию не могут соперничать элементами полупроводниковых микросхем и, значит, для устройств магнитной памяти не годятся. Вместо жидкого кристалла в устройствах магнитной памяти между электродов предлагается помещать слой

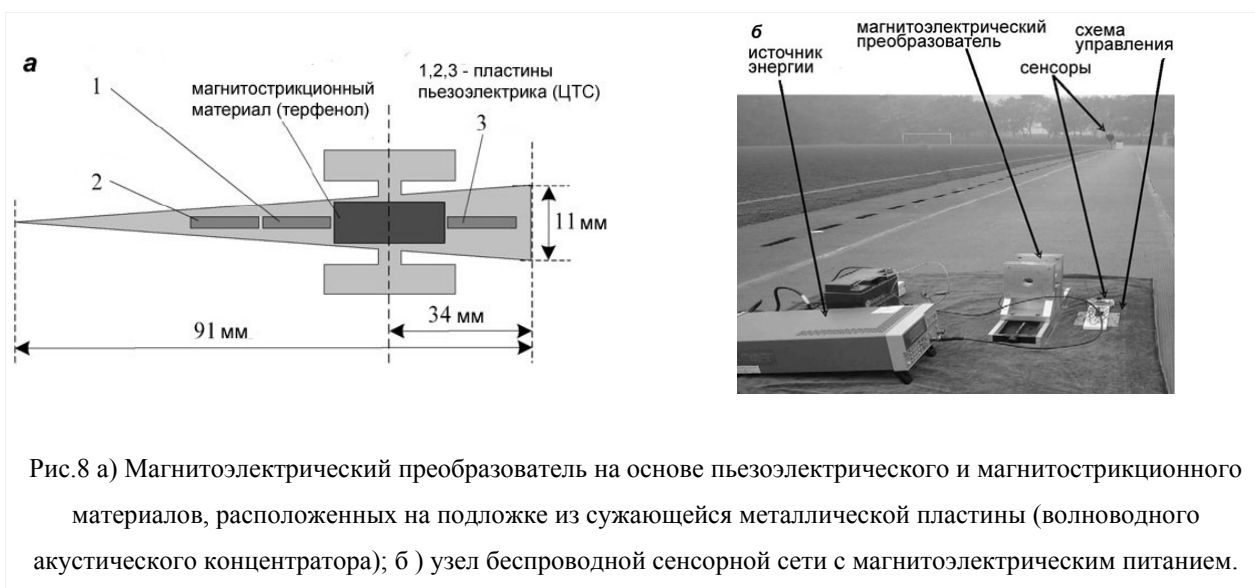
твёрдотельного магнитоэлектрика, однако, из-за малочисленности высокотемпературных магнитоэлектриков и больших токов утечки магнитоэлектрическая память все еще далека от реализации.

Ближе к практике

Как уже упоминалось, магнитоэлектрические композиты уже позволяют создавать датчики для измерения ультрамалых магнитных полей. Также большие надежды возлагают на магнитоэлектрики в энергосберегающих технологиях.

Миниатюризация электронных устройств сделала возможным использование беспроводных сенсорных сетей, представляющих собой множество датчиков, собирающих, обрабатывающих информацию и обменивающихся ей между собой. Такая «умная» сетевая структура может оказаться очень полезной в автоматизированном производстве, при экологическом мониторинге и в охранных системах.

Развитие беспроводных сенсорных сетей в первую очередь ограничивается проблемой энергоснабжения, особенно остро этот вопрос стоит в том случае, когда датчики внедрены внутрь исследуемых объектов (например, при измерении давления в шинах движущихся автомобилей) и не могут быть подключены к электросети. Самое простое решение этой проблемы – использование электрохимических батарей, однако развитие источников питания по части миниатюризации и емкости, идет далеко не столь быстрыми темпами, как развитие твердотельной электроники. Поскольку многие беспроводные сенсорные сети рассчитаны на годы работы, необходимы какие-то иные подходы.



Интересной возможностью представляется energy harvesting – получение энергии из окружающей среды. Это могут быть системы, накапливающие энергию механических, температурных или электромагнитных колебаний, но поток энергии, поступающий от естественных источников, мал – меньше 1 мкВт/см^2 (речь здесь не идет о световом излучении, поскольку, как уже говорилось ранее, датчики могут быть изолированными от

естественного света). Поэтому в случае сенсорных сетей часто необходим специальный источник переменного поля, мощности которого достаточно для беспроводного питания множества удаленных датчиков.

Китайские инженеры из Университета города Чунцина, например, создали магнитоэлектрическое устройство, способное длительное время (более 10 мин) накапливать энергию от переменного магнитного поля, преобразовывать ее в энергию батареи конденсаторов, а затем освобождать в виде электрического импульса длительностью порядка 1 с. Источником излучения является расположенный в грунте генератор вместе с антенной, создающий в месте расположения датчиков переменное магнитное поле звуковой частоты с амплитудой по порядку величины равной магнитному полю Земли. Преобразование энергии магнитного поля в электростатическую энергию заряженных конденсаторов осуществляется с помощью магнитоэлектрического элемента, состоящего из слоев магнитострикционного и пьезоэлектрических материалов, расположенных на общей металлической подложке, имеющей форму сужающейся к одному концу пластины (рис. 8 а). Переменное магнитное поле вызывает периодическую деформацию магнитострикционной пластины на резонансной частоте. Эти механические колебания передаются подложке и распространяются по ней, так что при подходе к узкому концу возрастает концентрация акустической энергии и амплитуда колебаний. Колебания подложки передаются пластинкам пьезоэлектрика, и в них возникает переменное электрическое напряжение. Данная конструкция является разновидностью магнитоэлектрического композиционного материала, однако при помощи акустического концентратора удастся получить выигрыш в два раза по сравнению с величиной магнитоэлектрического коэффициента для традиционной многослойной структуры из скрепленных магнитных и электрических слоев. На рис. 8 б представлена фотография основных узлов системы питания сенсоров. Магнитоэлектрический преобразователь, может питать сенсор, передающий информацию на 60-100м.

Для электропитания имплантов в медицине, автономных датчиков, а также средств связи и мобильной электроники, более подходящим решением представляется использование еще одного энергетического ресурса – механического движения или вибраций.

Одна из наиболее популярных схем сбора энергии основана на использовании упругой консоли (кантилевера) из пьезоэлектрического материала, механические колебания которой преобразуются в колебания электрического напряжения (см. рис.9 а). Если кантилевер изготовлен из магнитоэлектрического композиционного материала — слоя пьезоэлектрика, жестко скрепленного магнитострикционным слоем, то при

колебаниях кантилевера в магнитном поле Земли магнитострикционный слой испытывает дополнительные деформации, которые передаются связанному с ним пьезоэлектрическому слою, в результате чего амплитуда переменного напряжения удваивается по сравнению со случаем чисто пьезоэлектрического кантилевера, достигая десятка вольт. Такое устройство предлагается использовать на подводных аппаратах и буях, где всегда есть океанские волны и магнитное поле Земли.



Рис. 9. а - Механические колебания кантилевера из пьезоэлектрического материала преобразуются в электрическую энергию; б - пьезоэлектрический элемент для сбора энергии при ходьбе

Здесь надо сделать еще одно замечание: частоты колебаний ω , встречающиеся в естественных условиях невелики – герцы, от силы, десятки герц, а это означает, с одной стороны, малую мощность, вырабатываемую агрегатом (мощность пропорциональна произведению амплитуды силы инерции ($F \sim \omega^2$) на амплитуду скорости ($V \sim \omega$), т.е. кубу частоты), с другой стороны – совсем немикроскопические размеры устройств, способных вибрировать на этих низких частотах. В результате зарядное устройство вырабатывало всего лишь микроватт в пересчете на кубический сантиметр (для сравнения, литий-ионная батарея с емкостью 1 кДж/см³ может работать в таком режиме 30 лет). Лучших результатов ожидают от использования других видов колебательного движения: человеческого тела при ходьбе (расположенные в ботинке пьезоэлементы (рис.9 б) уже позволяют получать до 1 мВт/см³) и еще более высокочастотных вибраций мотора автомобиля – до 30 мВт/см³. В любом случае, о том, что данные элементы могут заменить аккумуляторы в сотовых телефонах и карманных компьютерах, речи пока не идет. Сам сбор урожая даровой энергии (“energy harvesting”) напоминает скорее процесс, описанный в известной сказке: “по сусекам поскрести, по амбарам помести”, и это объясняет, почему в таких случаях часто используют другой термин: “energy scavenging” (scavenging в буквальном переводе с английского означает “уборка, утилизация мусора”).

Проблема взаимосвязи магнитных и электрических явлений в твердом теле чрезвычайно многогранна, и в этом обзоре мы показали лишь некоторые ее стороны. Данная область науки активно развивается в наше время: остается еще множество вопросов, требующих ответа, а неизвестные эффекты ждут своих первооткрывателей.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сегнетомагнетики и мультиферроики: термины-химеры

На своё несчастье

Духов я призвал.

И.В. Гете «Ученик чародея»

Многие привычные нам слова представляют собой подобие мифологической химеры – животного с головой льва, туловищем козы и хвостом змеи. Так слово «автобус» получилось отсечением ничего не значащего окончания в слове «омнибус» (в переводе с латыни «всем», т.е. транспорт общественного пользования) и добавления к нему приставки от автомобиля (от др.-греч. αὐτο — сам и лат. mobilis — движущийся).

Научные термины дают филологам еще больший повод для возмущения. Так, термин «сегнетомагнетик» образован как соединение двух слов «сегнетоэлектрик» и «ферромагнетик». Само слово «сегнетоэлектрик» происходит от первого обнаруженного вещества со спонтанной электрической поляризацией – сегнетовой соли, названной по имени французского аптекаря



Сеньета (*Seignette*). Поэтому «сегнетомагнетик» уже представляет собой довольно странный гибрид, но еще большей химерой предстает современный термин «мультиферроик».



Три класса ферроиков: сегнетоэлектрические, магнитные и сегнетоэластические вещества. На пересечении этих множеств лежат мультиферроики.

Сеньета (*Seignette*). Поэтому «сегнетомагнетик» уже представляет собой довольно странный гибрид, но еще большей химерой предстает современный термин «мультиферроик».

Давно было замечено, что три класса веществ: ферромагнетики, сегнетоэлектрики и сегнетоэластики демонстрируют целый ряд сходных свойств: наличие характерной температуры фазового перехода (точки Кюри), гистерезиса (зависимости свойств от предыстории), самопроизвольное разбиение на домены и др. Это сходство нашло выражение в том, что в иностранной научной литературе их названия все начинаются с приставки «ферро»: ferromagnetics, ferroelastics, ferroelectrics, хотя если вспомнить исходный значение первой части слова «ферромагнетик», то оно соответствует латинскому «железный» (лат. ferrum). Таким образом, в приставке «ферро» не больше смысла, чем в окончании «бус». И подобно гоголевскому Носу, она, отделившись от хозяина, зажила своей жизнью: в середине прошлого века японский

ученый Кетзиро Айзу предложил называть все три класса веществ общим термином «ferroics», т.е. ферроики. Похожая история произошла в английском языке и с автобусом: “bus” – полноценное слово, означающее, кроме автобуса еще и канал передачи данных.

В случае ферроиков история имела продолжение: в начале девяностых годов прошлого века из бутылки был выпущен новый джин – термин «мультиферроик» (от лат. мульти – много) – для обозначения вещества, которое одновременно принадлежит хотя бы двум из классов ферроиков. В начале нашего столетия с появлением новых сред с магнитными и электрическими свойствами это слово неожиданно быстро завоевало признание и вытеснило первоначальный термин «сегнетомагнетик», так что сам создатель неологизма – швейцарский ученый Ганс Шмид, когда речь заходит о придуманном им термине, вспоминает стихотворение Гёте, отрывок из которого приведен в качестве эпиграфа.

Перовскит: история о том, как хобби увековечило имя в науке

Перовскитом называют титанат кальция CaTiO_3 – минерал темно-серого цвета, впервые найденный на Южном Урале близ города Златоуста. Обычно названия минералов звучат чуждо нашему слуху и неудобопроизносимы, например «альберхтштрауфит» или «касуэллсилверит» (см. например, статью «Химики, геохимики, кристаллографы» в Химии и жизнь 2012 n11).



Видный государственный деятель Л.А. Перовский (1792-1856)

В данном же случае минерал носит имя нашего соотечественника – Льва Алексеевича Перовского. Участник отечественной войны 1812 года, товарищ (т.е. заместитель) министра уделов, министр внутренних дел Лев Алексеевич, будучи важным чиновником, еще и страстно увлекался коллекционированием древностей и минералов, благодаря чему вошел в историю как инициатор обширных археологических раскопок и покровитель гранильного и камнерезного искусства.

Любопытно, что автор первой русской книги для детей – замечательной сказки «Черная курица или подземные жители» – Антоний Погорельский (настоящее имя Алексей Перовский) ни кто иной, как брат Л.А. Перовского.



кристалл перовскита в породе (месторождение в районе г. Златоуста)