

## Глава 6 Магнитоэлектрический сэндвич

**Идея: А.К. Звездин, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН**

**Исследовательская команда: Николай Белиовский, Иван Щигрев**

**Научный руководитель: А.П. Пятаков**

Когда лорд Сэндвич впервые зажал кусочек бекона между двумя ломтиками хлеба, он и не подозревал, что станет родоначальником фастфуда. Еще труднее ему было представить, что эта идея выйдет за рамки кулинарии, и создание сэндвич-структур станет одним из технологических приемов, а само имя лорда станет нарицательным (в английском языке, так еще и глаголом<sup>1</sup>).



В технологии сэндвич является воплощением идеи *композитного* материала: два материала, соединенные вместе, создают материал с новыми свойствами, не присущими каждой из компонент в отдельности. Например, сэндвич панели, представляющие собой слой пенопласта, зажатый между двумя стальными листами, сочетают теплоизоляционные и прочностные характеристики.

Задавшись целью сделать чувствительный датчик магнитного поля, мы поместили между двумя магнитами пьезоэлектрический звонок, так получился *магнитоэлектрический сэндвич*: под действием магнитного поля на контактах пьезоэлемента возникает электрическое напряжение, как если бы мы имели дело с особым *магнитоэлектрическим* материалом.

### «Магнитоэлектрический» vs. «Электромагнитный»

Не стоит путать слова «магнитоэлектрический» и «электромагнитный». При внешней схожести они означают совершенно разные по своей природе эффекты. Электромагнетизм ведет свое начало от первых опытов Ганса Христиана Эрстеда в 1820 году по магнитному действию электрического тока, позже в 1840 Майклом Фарадеем была найдена обратная связь: переменное магнитное поле порождало электрический ток, и, наконец, спустя еще сорок лет Джеймсом Клерком Максвеллом была построена единая теория электромагнитных явлений. Электромагнитные явления тесно связаны с *электродинамикой*, то есть проявляются они при *движении* электрических зарядов, а также при *изменении* магнитных и электрических полей во времени.

---

<sup>1</sup>Английский глагол to sandwich означает «помещать посередине», «размещать между».

Отличие магнитоэлектрических явлений состоит в том, что для превращения электричества в магнетизм и обратно не требуется ни движение зарядов, ни переменные поля. Это большое преимущество, поскольку с электрическими токами связаны дополнительные тепловые потери, а здесь статическое электрическое поле порождает намагниченность, а статическое магнитное поле электрическую поляризацию – мощность не расходуется. Возникает заманчивая возможность создания магнитов, которые бы подобно электромагнитам включались и выключались подачей или отключением электрического напряжения и при этом не расходовали бы энергии подобно постоянным магнитам. Никакого противоречия с законами электромагнетизма здесь нет, поскольку описанные эффекты происходят не в вакууме, а внутри веществ с особыми магнитоэлектрическими свойствами.

Первые предположения о существовании таких веществ делали еще в конце XIX века такие классики науки, как Вильгельм Конрад Рентген и Пьер Кюри, но они так и остались абстрактными догадками, поскольку рекомендаций, где искать такой материал или как создать его искусственно, классиками дано не было.

В середине прошлого века выдающимся американским электротехником и электронным инженером Б. Теллегеном была предложена идея создать магнитоэлектрическую среду в виде взвеси, в которой бы плавали частицы, представлявшие собой магнетики, сцепленные с кусочками электрета (среды, в которой долго сохраняется электрическая поляризация). Однако технически реализовать такой материал в то время было затруднительно.

Дело сдвинулось с мертвой точки только тогда, когда наши соотечественники Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, работая над своим знаменитым учебником теоретической физики, сформулировали необходимые условия существования магнитоэлектрического эффекта в веществе, тем самым резко сузив круг поиска. Спустя некоторое время ученик Ландау И.Е. Дзялошинский указал на вещество хромит ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) 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 выходили с некоторой задержкой), и руководствовались интуитивными соображениями. Узнав об открытии Астрова, они тут же провели исследования на хромите и продемонстрировали обратный

магнитоэлектрический эффект - электрическую поляризацию, наводимой 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 не превышали десятка милливольт.

С тех пор прошло более полувека и найдено множество магнитоэлектрических материалов. В некоторых из них магнитоэлектрические эффекты в сотни раз превосходят те, что были открыты в хромите, но наблюдаются они при температурах жидкого гелия. Материалы, которые, подобно хромиту, «работали» бы при комнатных температурах можно пересчитать по пальцам одной руки. Вот почему, отчаявшись найти подходящие вещества в природе, ученые принялись за конструирование искусственных магнитоэлектрических сред<sup>2</sup>.

## Магнитоэлектрические композиты

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

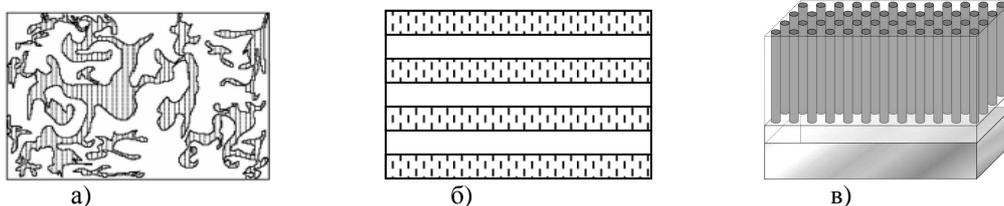


Рис 1. Композитные материалы а) объемные б) слоистые в) столбчатые

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

<sup>2</sup> Здесь, справедливости ради, надо отметить, что буквально в самое последнее время удалось найти естественные вещества с уникальными магнитоэлектрическими свойствами. Ими неожиданно оказались, хорошо знакомые всем, кто занимается магнетизмом, пленки ферритов гранатов (см. Главу 5 Микромир без микроскопа-2). В группе профессора А.С. Логгинова из Московского Университета было обнаружено, что границы магнитных доменов движутся под действием электрического поля (подробнее на сайте лаборатории <http://photospin.ru>)

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*: частицы перемешивались как попало, иногда образуя комки и сгустки, как в манной каше. В результате величины эффектов менялись от образца к образцу, а слияние частичек магнитострикционного материала в проводящие каналы (рис.1 а) приводило к «короткому замыканию» образца, сводя на нет получавшийся на нем электрический сигнал.

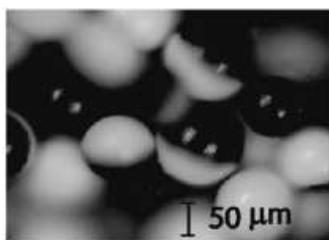
Неудача с первыми композитами привела исследователей к идее *слоистых композитов*, которые состояли из чередующихся слоев магнитострикционного материала и пьезоэлектрического (рис. 1б), склеенных вместе (в первых опытах для этой цели использовался обыкновенный эпоксидный клей, которым чинят обувь). Такое 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).

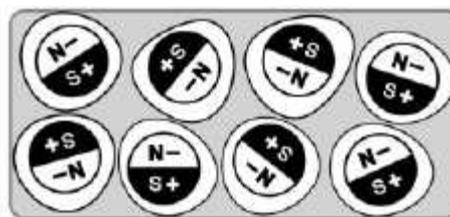
Решение этой проблемы было найдено спустя десять лет с изготовлением *столбчатых наноструктур*, в которых связь с подложкой уже не препятствовала

растяжению/сжатию столбцов в вертикальном направлении (рис. 1 в). Самое интересное, что эти столбики не нужно создавать искусственно, они организуются сами при одновременном осаждении на подложку двух веществ: пьезоэлектрического (например, титанат бария  $\text{BaTiO}_3$ ) и магнитоотрицательного (например, шпинели  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ). 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.

Только в последние годы с появлением так называемой «электронной бумаги» удалось реализовать идею Теллегена о сцепленных друг с другом частичках, вращающихся в жидкости. Электронная бумага или гирикон (от греческого «вращающееся изображение») представляет собой полимерную среду, в которую внедрены двуцветные сферические частицы из полиэтилена, свободно вращающиеся внутри полостей с жидкостью (рис.2). Две полусферы частицы отличаются не только цветом, но и электрическим зарядом – темная сторона 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. 2 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.

Ученые А. Гош, Н.К. Шеридон и П. Фишер предложили добавить к свойствам электронной бумаги еще одно свойство – магнитное, путем введения в материал частиц магнитных примесей. Так среда приобретала эффективные магнитоэлектрические свойства: теперь подачей электрического напряжения можно было управлять намагниченностью гирикона, не расходуя энергию на электрические токи.

К сожалению, частицы не очень поворотливы: 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. Долгое время считалось, что кристаллический тип упорядочения присущ только твердым телам. Но нет правила без исключения: как есть твердые жидкости – стекла (см. главу Капля на камертоне), так и есть жидкие кристаллы. 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. 3 а). Жидкокристаллические мониторы работают благодаря свойству молекул нематика поляризоваться в электрическом поле и ориентироваться вдоль него (рис 3 б), при этом меняется цвет жидкокристаллической ячейки (в простейшей версии жидкокристаллических дисплеев с серебристого на черный<sup>3</sup>). Ученым из Тайваньского Университета Цунг-Джу Лину (Tsung Ju Lin) с коллегами пришла идея размещать магнитные наностержни в жидком кристалле (диаметром 6 нм и длиной 50 нм). При этом стержни ориентировались вдоль направления молекул жидкого кристалла и поворачивались вместе с ними (рис. 3). Таким образом, удалось получить магнитный материал, управляемый с помощью электрического поля. Причем магнитный жидкий кристалл гораздо живее откликался на изменение электрического поля, чем частицы гирикона – частота переключения составляла килогерцы.

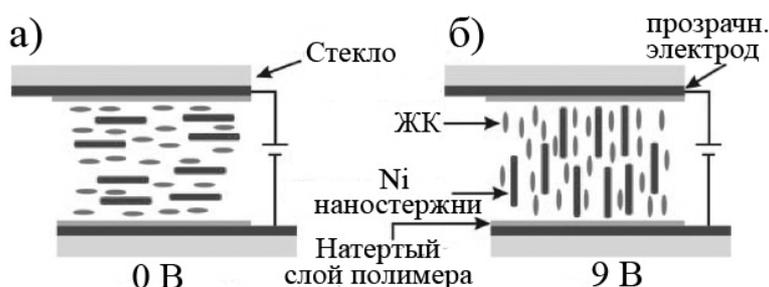


Рис. 3. Жидкий кристалл с магнитными включениями в виде наностержней. а) ориентация молекул жидкого кристалла и наностержней в отсутствие поля б) ориентация молекул и наностержней при включении электрического поля.

## Композит быстрого приготовления

Идею композитного материала можно реализовать гораздо проще, чем это описано выше, не используя высокие технологии или специальные дорогие материалы. Для этого потребуется два магнита, вроде тех, что используются на досках для маркеров или в

<sup>3</sup> Подробнее об устройстве жидкокристаллической ячейки и о других удивительных свойствах этих веществ можно прочитать в книжке Л. М. Блинова и С. А. Пикина «Жидкие кристаллы» серии «Библиотечка «Квант»», выпуск 20.

магнитных «липучках» чехлов для мобильных телефонов (если хотите получить более сильный эффект, то лучше брать магниты из жестких дисков), двусторонний скотч и пьезоэлемент, который можно купить в магазине радиодеталей за 50-100 рублей (мы использовали пьезозвонк ЗП-1 0504).

Верх и низ пьезоэлемента оклеиваются двусторонним скотчем к внешним сторонам которого приклеиваются два магнита. Нижний магнит закрепляется неподвижно на подложке. Магнитоэлектрический сэндвич готов!

При внесении датчика в магнитное поле, один из магнитов (подвижный) незначительно смещается, в результате чего изначальное сжатие пьезоэлектрика увеличивается или уменьшается в зависимости от полярности магнита, создающего внешнее поле, а это приводит к изменению выходного напряжения.

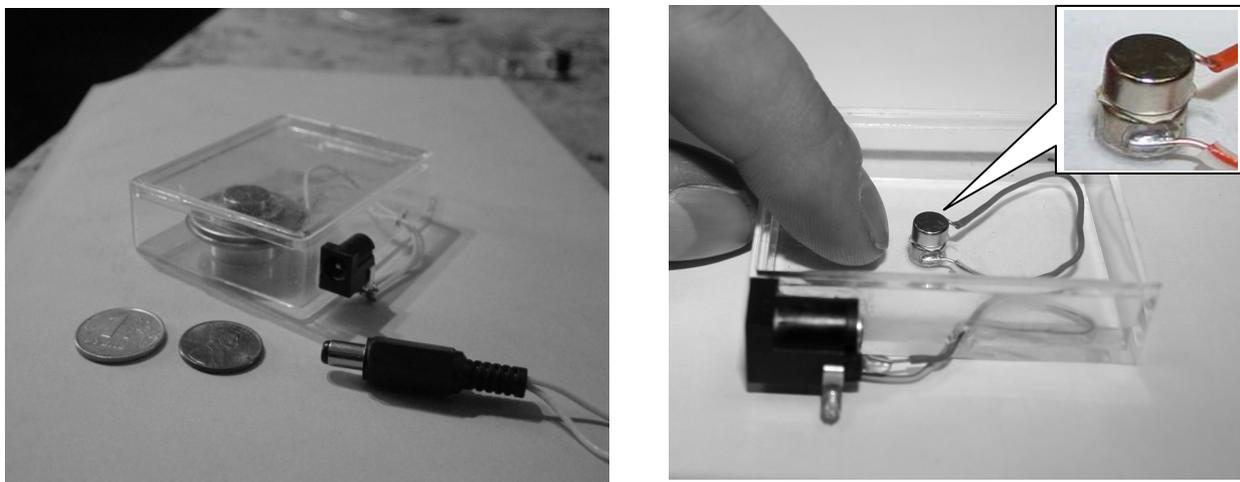


Рис. 4 Датчик магнитного поля а) модель на основе стандартного пьезозвонка б) миниатюрная версия, на основе слоя пьезоэлектрика.

Справедливости ради надо признать, что простота устройства датчика обманлива, поскольку, хотя электрический сигнал и появляется на контактах пьезодатчика, его не так уж легко снять, не нарушив при этом работу прибора. Дело в том, что при измерениях обычным вольтметром пьезоэлемент, подобно конденсатору, разряжается через вольтметр, который имеет хотя и высокое (10 МОм), но все же конечное сопротивление. Разряд происходит меньше чем за сотую секунды, что делает невозможным измерение постоянного магнитного поля. Поэтому снимать сигнал с пьезодатчика нужно либо с помощью специального электростатического вольтметра, само устройство которого исключает протекание каких либо токов, либо, смастерив буферную схему (как ее сделать, описано в Приложении).

## Датчик в действии

Недостаточно просто сконструировать датчик, для того чтобы он был рабочим прибором, его нужно откалибровать, то есть измерить электрический отклик в магнитном поле известной напряженности.

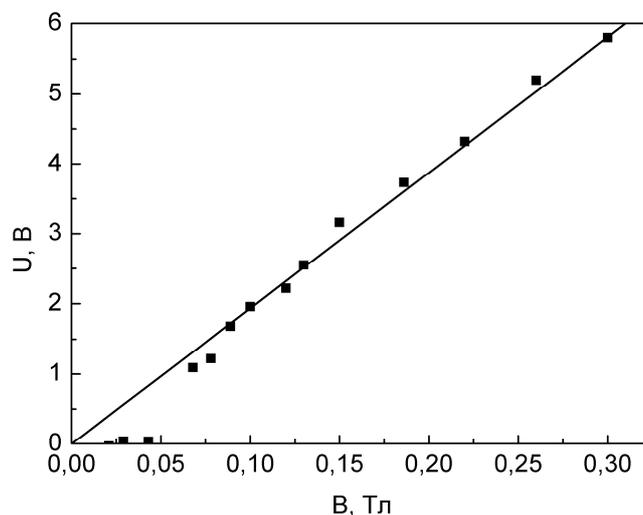


Рис. 5. Зависимость напряжения на выходе датчика от величины внешнего магнитного поля.

Такая зависимость электрического напряжения от магнитной индукции поля представлена на рисунке 5. Для создания магнитного поля мы использовали постоянный магнит, расстояние до которого менялось с шагом 1мм. Непосредственно перед калибровкой мы с помощью стандартного датчика Холла ДХК-0.5А измерили, какому расстоянию какая магнитная индукция соответствует<sup>4</sup>. Экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую, за исключением участка низких полей (до 0.05 Тесла), где магнитные поля в силу малости могли быть измерены недостаточно точно.

Возникает вопрос, как зависит чувствительность прибора от его геометрических размеров, ведь наибольший практический интерес представляют именно миниатюрные датчики? В основном это определяется размерами пьезоэлектрического слоя: чем он толще, тем больше электрическое напряжение можно получить, поскольку при механическом сжатии в пьезокерамике возникает электрическое поле  $E$ , а напряжение  $U$ , как известно, прямо пропорционально расстоянию  $d$  между точками, в которых измеряется потенциал:

$$U = E \cdot d$$

Это обстоятельство, конечно, препятствует изготовлению сколь угодно тонких датчиков, здесь, как это часто бывает, должен быть найден компромисс между величиной электрического отклика и толщиной устройства.

<sup>4</sup> Как проводить измерения с помощью датчика Холла, подробно рассказано в энциклопедии магнетизма на сайте предприятия «Валтар» <http://www.valtar.ru>

С другой стороны, для пьезоэффекта важно именно давление, а не сила, действующая на пьезоэлектрический слой, зажатый между двумя магнитами, а это означает, что величина снимаемого напряжения никак не должна зависеть от *поперечных* размеров сэндвича. Это позволяет, не изменяя толщины слоев, существенно уменьшить объем датчика за счет уменьшения их площади.

Наши датчики при толщине пьезоэлектрического слоя 5 мм позволяли получить выходной сигнал в 300 раз больший, чем тот, что давал стандартный датчик Холла, который мы использовали для независимого измерения магнитных полей.

### Монета-перевертыш

Интересные явления наблюдались при замене верхнего магнита, на слой магнитомягкого (т.е легко перемагничивающегося) материала, в качестве такого мы использовали 50-копеечную монету. Зависимость электрического напряжения от магнитного поля переставала быть линейной, зато прекрасно ложилась на параболу (Рис.6). Это можно объяснить тем, что сила монеты как магнита не постоянна, а зависит от внешнего поля прямо пропорционально: чем больше поле, тем сильнее становится верхний магнит.

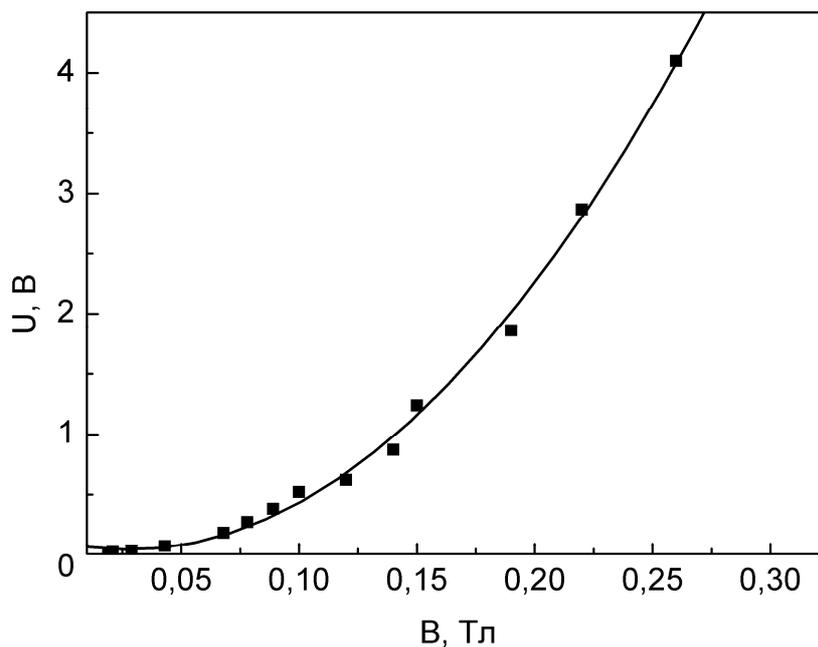


Рис. 6

Если внешнее поле было противоположно полю, создаваемому нижним магнитомягким слоем (это легко можно устроить перевернув сторонний магнит), то зависимость становится совсем замысловатой (рис.7 а).

Для того чтобы разобраться в том, что происходит, мы решили сделать намагниченность видимой, как говорят, визуализировать. Для этого можно использовать индикатор магнитного поля<sup>5</sup> (рис. 7 б).

Мы заметили, что кривая магнитоэлектрического отклика выходит на параболу (точка 1) как раз тогда, когда внутри однородно намагниченной копейки зарождается полюс противоположной полярности. Его границы постепенно расширяются и доходят до границ самой монеты (рис.7 в).

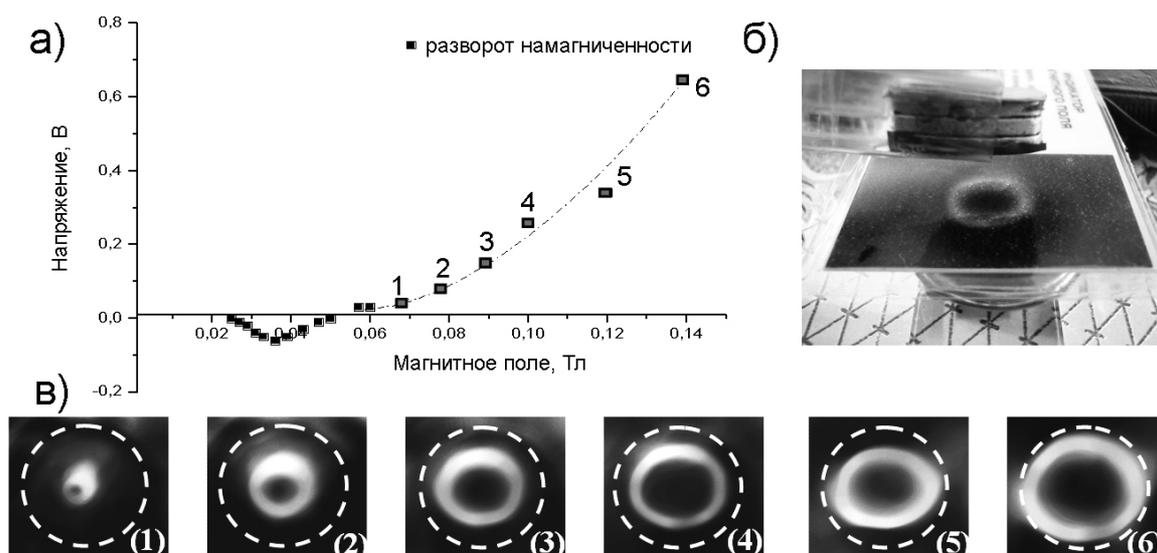


Рис.7 а) магнитоэлектрическая зависимость для монеты, перемагничивающейся в поле внешнего магнита б) индикатор магнитного поля в) визуализация процесса перемагничивания монеты с помощью индикатора магнитного поля: (1) появление области противоположной полярности (2-6) ее постепенный рост до границ монеты.

## Резюме

Итак, нами предложена простая конструкция датчика магнитного поля на основе слоистой структуры магнит/пьезоэлектрик/магнит, достоинствами которой являются: низкое потребление мощности (даже если задействовать буферную схему, мощность меньше 1 нВт), большой выходной сигнал (коэффициент чувствительности датчика  $K=70$  В/Тесла, что превосходит чувствительность стандартного датчика Холла), возможность измерения статических полей. Также несомненным достоинством является доступность компонентов: центральная ее составляющая, пьезоэлектрический звонок, стоит не более 100 рублей.

<sup>5</sup>Подробнее о визуализаторе смотри главу «Скрытая жизнь неживой материи»

## Приложение

В ходе проведения измерений мы столкнулись с проблемой быстрого разряда датчика. Для того чтобы напряжение на контактах держалось хотя бы секунду, нужно было, чтобы вольтметр, с помощью которого мы мерили напряжение, имел сопротивление больше 1 ГигаОма. У обычного же вольтметра оно порядка 10 МОм. Для большинства задач этого вполне достаточно, и он может быть сочтен «идеальным», но, увы, не в нашем случае.

Между вольтметром и датчиком нужно ввести некоторый буфер, который с одной стороны, должен передавать напряжение от датчика к вольтметру без изменений, а с другой стороны надежно их друг от друга изолировать. Это означает, что сопротивление между входными контактами буфера, к которым подключается датчик, должно стремиться к бесконечности, а между выходными контактами, к которым подключается вольтметр, напротив, сопротивление должно быть как можно меньшее, при этом буфер ведет себя как своего рода идеальный источник напряжения с нулевым внутренним сопротивлением и все напряжение падает на вольтметре (рис. А1).

Такую чудодейственную схему можно создать на основе усилителя с очень большим коэффициентом усиления  $K$ . Такие усилители называются операционными, поскольку на них раньше, в докомпьютерную эпоху, производились вычисления (операции), теперь же они играют вспомогательную роль. На схемах операционный усилитель изображается в виде треугольника с двумя входами («+» и «-») и одним выходом. Сигнал на выходе есть увеличенная в  $K$  раз разница между напряжением на «+» входе и напряжением на «-» входе:

$$U_{\text{вых}} = K (U^+ - U^-)$$

А теперь соединим проводом выход и вход «-» операционного усилителя (рис. А2). В этом случае  $U^- = U_{\text{вых}}$  и для выходного напряжения получаем:

$$U_{\text{вых}} = \frac{K}{1 + K} U^+ \approx U^+$$

то есть операционный усилитель в режиме «змеи кусающей себя за хвост» работает как *повторитель*, оставляя напряжение, поданное на вход «+» неизменным. При этом входное сопротивление всех операционных усилителей велико, а выходное мало. Это все что нам требуется от буферной схемы.

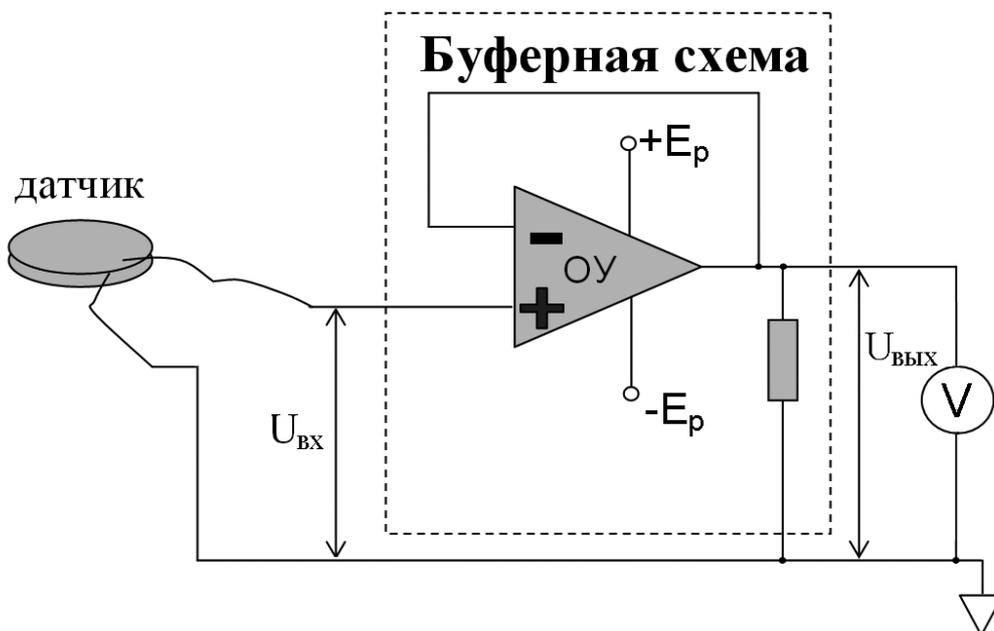


Рис. А1. Схема подключения датчика к вольтметру через повторитель.