

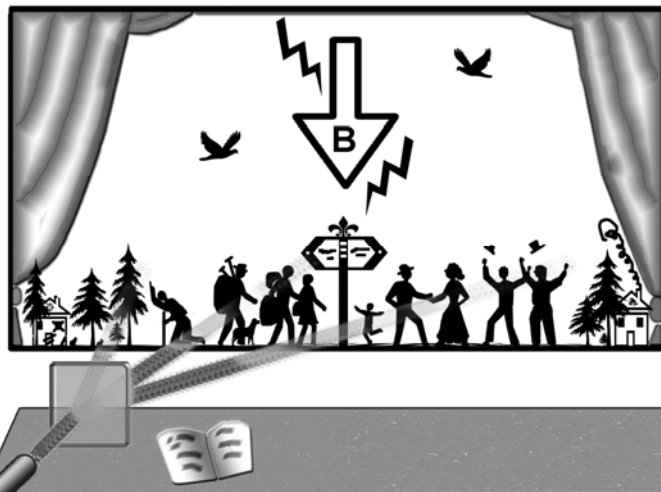
Глава 5. Микромир без микроскопа-2

Скрытая жизнь неживой материи

Исследовательская команда: Людмила Нам, Дмитрий Власенко

Научный руководитель: А.П. Пятаков

Луч лазерной указки позволяет проникнуть в тайны живой материи... Может быть метод изучения микромира, разработанный в предыдущей главе, подойдет и для объектов неживой природы, например кристаллов, упорядоченный и застывший мир которых часто противопоставляют изменчивому миру живого? И так ли велика



пропасть между живым и неживым? Например, внутри магнитных кристаллов существует особый мир доменов, ведущих себя совсем как живые существа... Не покажут ли они на экране в луче лазерной указки пьесу о своей жизни?

Магнитные домены

Каждый да держит вотчину свою.

Решение Любечского съезда князей, 1097г.

Из истории средних веков вы, наверное, знаете, что когда-то государства не были похожи на те образования, которые мы видим сейчас, а были разбиты на *домены* – мелкие области, которыми управляли местные властители, устанавливая в них свои порядки, часто не считаясь с центральной властью. В результате государство не оказывало такого влияния вовне, какое могло бы, располагая теми же ресурсами, будь оно подчинено единой воле.

Нечто похожее происходит и в природе. Например, магнитные тела тоже внутри себя разбиваются на домены (по-разному намагниченные области), так что в результате суммарное магнитное поле и связанная с ней дополнительная энергия вне тела становятся близкими к нулю (рис. 1).

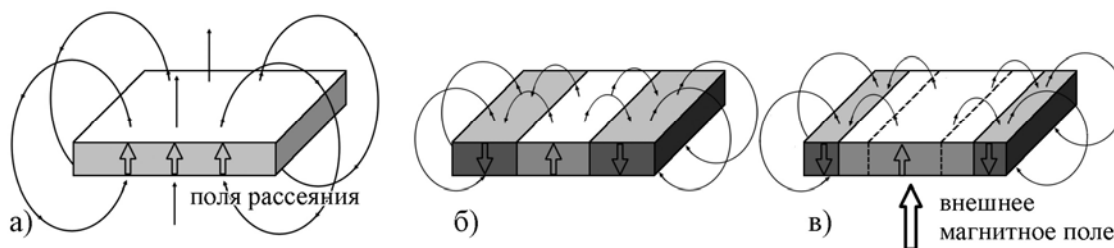


Рис. 1 а) образец в однородно намагниченном состоянии создает большие поля рассеяния вокруг образца. б) вокруг образца, разбитого на домены, линии магнитного поля замыкаются «коротким путем», и суммарное поле на расстоянии порядка ширины домена уже невелико. в) изменение доменной конфигурации во внешнем магнитном поле: домены с направлением намагниченности по полю расширяют свои пределы за счет соседей с противоположной намагниченностью.

Если поместить образец в магнитное поле, то домены «оживут» их границы начнут двигаться, одни области растут, другие съеживаются (рис. 1 в). Когда поле достаточно сильно, то единый порядок распространяется на всю область образца, он становится одним большим доменом, своего рода централизованное государство, подчиненное воле правителя.

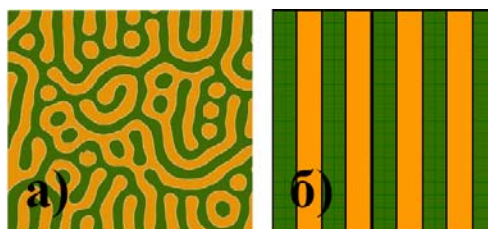


Рис. 2. Два типа доменных структур: а) лабиринтная б) полосовая

Иногда домены принимают довольно причудливые формы (рис. 2 а), а иногда вытягиваются в аккуратные полосы (рис.2 б), это уже зависит либо от свойств материала, определяемых его симметрией, либо от конфигурации внешних полей.

Как увидеть домены, и что они могут показать

Существование магнитных доменов было постулировано одним из классиков магнетизма Пьером Эрнестом Вейсом еще 1907 году, а увидеть их впервые удалось лишь 30 лет спустя Френсису Биттеру. Он использовал способ, который чем-то напоминает известную школьную демонстрацию с железными опилками. Сейчас для того чтобы сделать магнитное поле видимым, используют более удобные индикаторы магнитных полей в виде специальных пленок (рис. 3а). Внутри такой пленки в гелевом слое находятся миллионы субмикронных магнитных частичек, которые перемещаются в области большей напряженности магнитного поля (к полюсам), оставляя за собой разрежения, выглядящие как светлые участки. Места, где группируются частицы,

становятся, напротив, более темными. Биттер в свое время вместо пленки наносил на поверхность магнитного материала тонкий слой жидкости со взвешенными в ней магнитными частицами. Частицы перераспределялись под действием полей рассеяния от доменов, в результате чего получался узор, образованный сгустками и разрежениями частиц, повторяющий доменные конфигурации (рис. 3 б). Домены были настолько мелки, что получавшиеся узоры можно было видеть только под микроскопом.

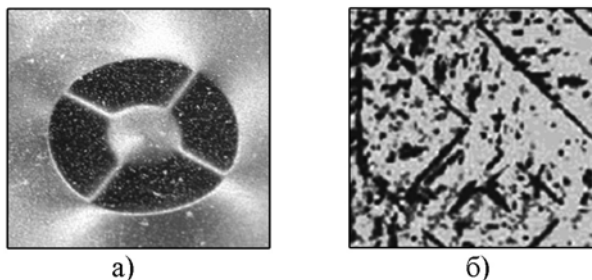


Рис. 3 а) индикатор магнитных полей¹ а) изображение доменов в монокристалле железа методом Биттера

Гораздо более зрелищные картины доменной структуры можно было бы получить, заставь домены каким-нибудь образом воздействовать на свет, прошедший сквозь магнитный материал или отраженный от его поверхности. Еще задолго до Биттера великий английский естествоиспытатель Майкл Фарадей, стремясь установить взаимосвязь электромагнетизма со световыми явлениями обнаружил замечательный эффект: при прохождении через прозрачную среду, помещенную в сильное магнитное поле плоскость, в которой происходят колебания в световой волне, поворачивается (рис.4). Эта плоскость иначе называется *плоскостью поляризации* волны, а эффект вращения плоскости поляризации в намагниченном веществе стал называться *магнитооптическим эффектом Фарадея*. Вращение плоскости поляризации зависит от того, сонаправлены или противоположно направлены вектор магнитного поля и направление распространения света (рис. 4. а). Интересно, что схожий эффект поворота плоскости поляризации наблюдается в стеклянной болванке, вращающейся вдоль оси, совпадающей с направлением распространения света (рис. 4 б): направление поворота плоскости поляризации совпадало с направлением вращения болванки.

¹ Такой индикатор можно купить у фирм, занимающихся производством и распространением магнитных материалов. Например, подобный индикатор от компании АМТ&С (<http://amtc.ru>) стоит около 500р.

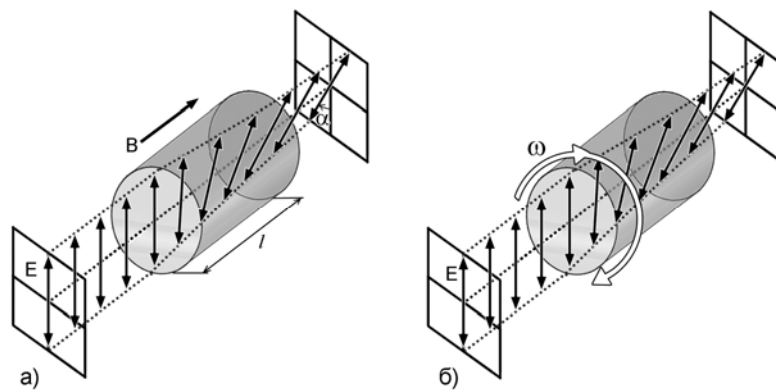


Рис. 4. а) Эффект Фарадея б) Эффект «вращательного увлечения эфира»: изменение плоскости поляризации света при прохождении сквозь вращающийся прозрачный материал.

Это эффект получил красивое название, «под старину», *эффект вращательного увлечения эфира*, хотя к тому времени эфир успели уже изгнать из электромагнетизма. Суть его состоит в том, что кванты света, взаимодействуя с веществом, в котором они распространяются, приобретают дополнительный вращающий момент (спин). Если вспомнить, что магнетизм, в конечном итоге, сводится либо к круговому движению зарядов, либо к вращению (в микромире ему соответствует спин элементарных частиц), а направление магнитного поля связано с направлением электрического тока правилом буравчика (рис. 5), то родство магнетизма и явления вращения плоскости поляризации света становится более понятным.

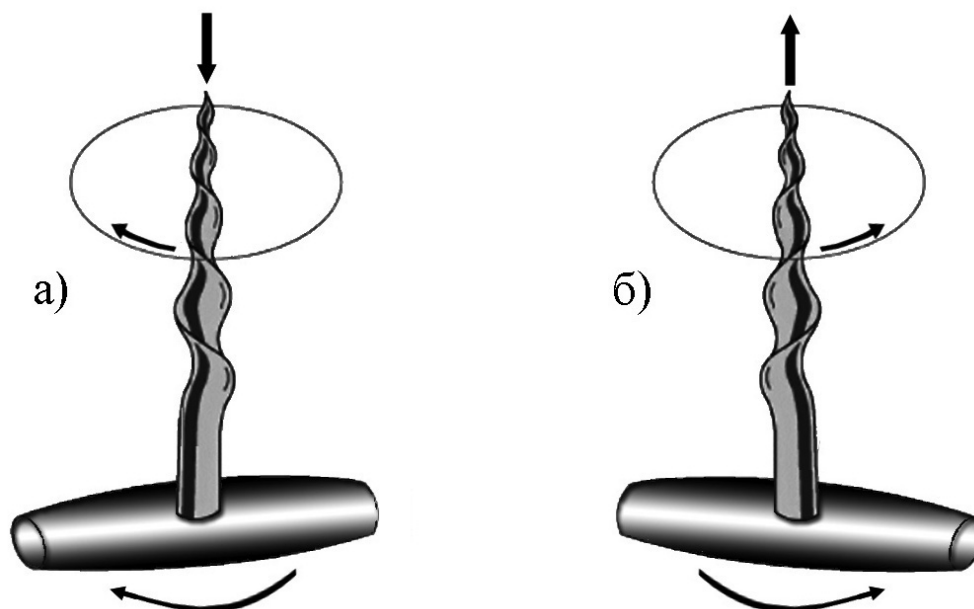


Рис. 5 Правило буравчика: магнитное поле связано с направлением тока как поступательное движение буравчика связано с его вращательным движением: а) вращение против часовой стрелки (если смотреть со стороны рукоятки) – выворачивающийся винт б) вращение по часовой стрелке – вворачивающийся винт.

Чем больше магнитное поле B , и чем больше путь l , проходимый светом в намагниченном веществе, тем больше угол поворота поляризации.

$$\alpha = VBl$$

где V – константа Верде, для стекла $V=10$ град/(Тл·см), это означает, что в поле около 10 полей Земли (0.001Тл) поляризация повернется на один градус при прохождении метрового слоя материала. При таких толщинах даже стекло уже перестает быть прозрачным, и становятся значительны потери света.

Спустя столетие после открытия Фарадея обнаружилось, что существуют материалы, в которых эффект поворота поляризации чрезвычайно силен: тот же угол поворота в несколько градусов достигается не на метровом расстоянии, а на каких-то 10 микронах. Материал с такой толщиной представляет собой уже не объемный кристалл, а скорее пленку. Рекордсменами по части величины магнитооптических эффектов оказались пленки ферритов гранатов, выращенные на прозрачной немагнитной подложке. Кристаллы феррит-граната по форме и цвету напоминают зерна плодов гранатового дерева, а цвет пленок из этого материала можно назвать скорее рыжеватым. Высокая прозрачность пленок в сочетании со свойством вращать поляризацию света делает их незаменимым материалом для изучения свойств магнитных доменов.

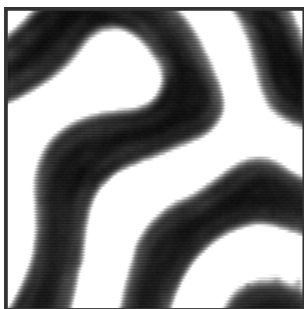


Рис. 6 Вид магнитных доменов в поляризационном микроскопе (размер доменов ~ 20 мкм).

На рисунке 6 показаны изображения, полученные в поляризационном микроскопе. Это микроскоп, в котором исследуемый образец располагается между двух поляризаторов — фильтров, пропускающих только световые волны, направление колебаний в которых происходит вдоль определенного направления (оси поляроида).

Каким образом удастся сделать домены видимыми, поясняет рисунок 7.

Ориентируем оси поляроидов так, чтобы они образовывали угол, немного отличающийся от прямого (обычно его подбирают равным как раз тому углу, на который поворачивается поляризация света в магнитном материале). Тогда поляризация света, прошедшего через домены I, поворачивается на угол α против часовой стрелки, в результате чего колебания световой волны оказываются перпендикулярными оси второго поляризатора. Такая волна сквозь второй поляризационный фильтр не пройдет, поскольку проекция колебаний в волне на его ось равна нулю. В результате домены I выглядят как темные области. Напротив, поляризация света, прошедшего сквозь домены II, поворачивается по часовой стрелке на угол α , и, с учетом первоначального угла, колебания в световой волне дают заметную проекцию на ось второго поляроида (рис.7)—

часть света проходит через второй поляризатор, и мы видим на месте доменов II светлые области².

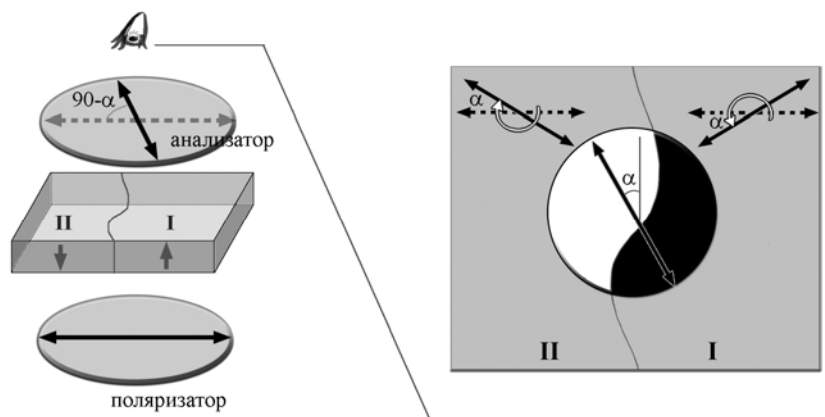


Рис. 7. Визуализация магнитных доменов с помощью поляризаторов

Будучи помещенными во внешнее магнитное поле, пленки феррит-гранатов перестраивают свою структуру.

Если поля велики, то эта перестройка настолько радикальна, что от прежнего рисунка доменов не остается и следа, а видимая картина повторяет распределение полей. Именно таким образом можно сделать видимой запись на магнитных носителях: видеоманитофонных лентах, жестких дисках и дискетах. При первом взгляде на рисунок 8 можно подумать, что на нем изображен паркетный пол, но именно так выглядит цифровая видеозапись.

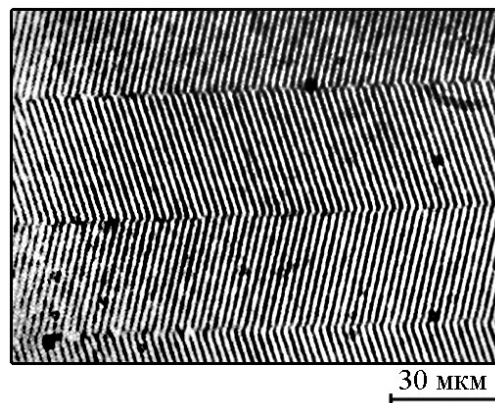


Рис. 8 Изображение цифровой видеозаписи, полученное с помощью пленок ферритов гранатов.

С помощью пленок проверяют подлинность видео и аудиозаписей, а также устанавливают, на каком приборе она была произведена, можно даже восстановить частично утраченную информацию с поврежденных носителей, расшифровывать «черные ящики»³.

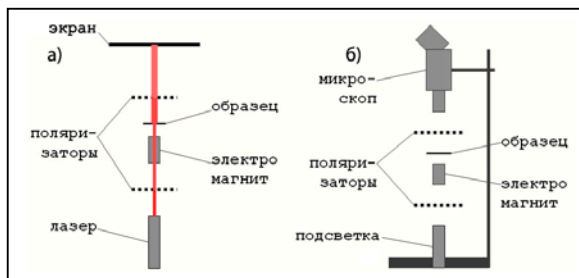
Домены в театре теней

Так домены живут своей жизнью и позволяют проникнуть в тайны людей. Остается пожалеть, что все это действие происходит в столь крошечном мире, не доступном простому взгляду. Но так ли недоступному?

² Подробнее о магнитооптических явлениях можно прочитать в книжке серии Квант «Фотонные кристаллы и другие метаматериалы» Приложение к журналу "Квант". Выпуск 94

³ О том, как это делают, можно прочитать на сайте компании "НИИМВ" http://www.niimv.ru/page_07.html

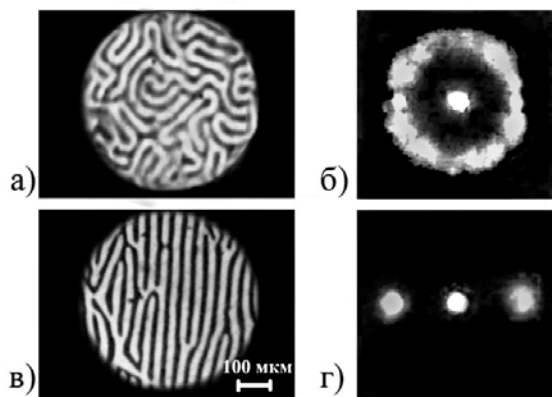
Как учит нас опыт, почерпнутый при исследовании клеточных структур, для того чтобы заглянуть в микромир, не нужно иметь микроскопа, достаточно просветить магнитный образец лучом лазера и наблюдать дифракционные узоры, появляющиеся на стене. В схеме эксперимента, очень похожей на схему из прошлой главы, появятся только два новых элемента – скрещенные поляризаторы (рис. 9 а), так как без них, как мы уже знаем, магнитная пленка неотличима от однородной поверхности.



Надо сказать, что поляриды, продающиеся в фотомагазинах, весьма дороги, поэтому в качестве замены мы часто пользовались поляризационными пластинками, добытыми из жидкокристаллического дисплея неработающего калькулятора или мультиметра.

Более того, поскольку луч лазерной указки частично поляризован, то картину дифракции, пусть и менее отчетливую, можно было наблюдать и вовсе без поляридов, просто просвечивая магнитный образец.

С помощью электромагнита мы могли перестраивать доменную структуру и наблюдать, как зависит дифракционная картина от величины магнитного поля.



Для сравнения нашего метода с обычным магнитооптическим мы также проводили контрольные наблюдения в микроскоп (рис. 9б), замечая, как меняются основные параметры структуры в зависимости от поля (период, относительная ширина, расположение доменов). В этом традиционном методе для того, чтобы увидеть домены, поляризаторы уже совершенно необходимы,

поскольку для подсветки в микроскопе используется обыкновенный неполяризованный свет. Магнитооптическое изображение основных типов доменных структур (лабиринтной и полосовой) и соответствующие им дифракционные изображения показаны на рисунке 10. Бросается в глаза различие дифракционных узоров для двух типов структур. Полосовая доменная структура создавала дифракционную картину подобную той, которая получается от дифракционной решетки (центральный максимум и два максимума первого порядка), а картина, соответствующая лабиринтной доменной структуре, была в первом

приближении центрально симметричной: главный максимум посередине и кольцо вокруг него, что отражает отсутствие в ней выделенного направления.

По дифракционной картине мы смогли оценить средний период доменов и разброс его значений: 43 ± 15 мкм для полосовой и 55 ± 10 мкм для лабиринтной структур (подробнее о методе измерений периода смотри предыдущую главу «Микромир без микроскопа»).

Во внешнем магнитном поле интенсивность центрального максимума возрастает, а интенсивность боковых максимумов падает, что объясняется нарушением равенства площадей, занимаемых противоположными доменами. Интересно, что положение максимумов первого порядка при увеличении поля, также как и радиус кольца, практически не изменялись, в то время как структура, видная под микроскопом, заметно искажалась. Эта независимость положений максимумов от внешнего магнитного поля, изменяющегося в довольно широких пределах (от нуля до значений, близких к полю коллапса магнитных доменов ~ 10 Э – в двадцать раз больше магнитного поля Земли) говорит о том, что период доменов практически неизменен. Только в области полей, в непосредственной близости к полю, в котором происходит разрушение доменов, наблюдается заметное изменение конфигураций дифракционной картины.

Заключение

Конечно, с магнитными пленками прозрачных материалов нам приходится сталкиваться не так часто, как с насекомыми или креветками из предыдущей главы, но исследователи, имеющие с дело с ними постоянно, оценят такой экспресс-метод определения типа, периода и степени регулярности доменной структуры, взамен трудоемкого способа, используемого в настоящее время, с многократными обмерами изображений в недешевом поляризационном микроскопе. Ведь все что требуется — это только просветить лазерной указкой образец и измерить положение дифракционных максимумов на экране с помощью линейки.