

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**«Исследование обратного магнитоэлектрического эффекта в
двухслойных композитных образцах»**

Выполнила студентка

419 группы

Ефремова Светлана
Леонидовна

Научный
руководитель:

дфмн., профессор

Шалыгина Елена
Евгеньевна

Допущена к защите « 29 » мая 2018 года.

Зав. кафедрой _____

Проф. Перов Н.С.

Москва

2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. Обзор литературы.....	4
1.1 Магнитоэлектрический эффект	4
1.1.1 Применение магнитоэлектрических материалов	8
1.2 Аморфные магнитные материалы	10
1.3 PZT-материалы.....	13
Глава 2. Методика эксперимента.....	15
2.1 Изучаемый образец	15
2.2 Методика эксперимента	15
2.2.1 Магнитооптическая установка	17
2.2.2 Анализ погрешностей эксперимента	21
Глава 3. Полученные результаты и их обсуждение.....	23
ВЫВОДЫ.....	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	27
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	28

ВВЕДЕНИЕ

Материалы, обладающие двумя и более из возможных типов упорядочения (так называемые мультиферроики), представляют большой интерес для исследований в связи с широкими перспективами их практического применения. В мультиферроиках, проявляющих одновременно сегнетоэлектрические и ферромагнитные свойства, могут наблюдаться магнитоэлектрические (МЭ) эффекты, проявляющиеся в изменении электрической поляризации образца P под действием внешнего магнитного поля H (прямой МЭ эффект) или в изменении намагниченности образца M под действием электрического поля E (обратный МЭ эффект).

В 1959 г. И.Е. Дзялошинским было теоретически доказано существование класса магнитоупорядоченных кристаллов, в которых возможны МЭ эффекты. Экспериментальное наблюдение обратного МЭ эффекта в 1960 г. положило начало активным исследованиям МЭ эффектов в кристаллах и разработке новых устройств на их основе. Однако использование однофазных мультиферроидных сред в практических целях ограничено малой величиной МЭ эффекта в них, а также тем, что МЭ эффект в таких кристаллах наблюдается при низких температурах.

В настоящее время для получения МЭ эффектов большой величины создаются композитные мультиферроики путём соединения пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз. При внесении такого композитного материала в магнитное поле ферромагнитная фаза деформируется вследствие эффекта прямой магнитострикции. Пьезоэлектрической компоненте передаётся механическое напряжение, и в ней возникает поляризация (прямой пьезоэлектрический эффект). Таким образом, в композите возникнет прямой МЭ эффект. Возможен также обратный эффект: при приложении электрического поля деформируется пьезоэлектрическая фаза, механическое напряжение передаётся

ферромагнитной компоненте, и она приобретает намагниченность вследствие обратной магнитострикции.

Перспективными материалами для использования в качестве ферромагнитной фазы в композитах являются аморфные сплавы, что обусловлено их уникальными магнитными свойствами, такими как малое значение коэрцитивной силы, высокая намагниченность насыщения и отличная от нуля магнитострикция, а также низкой стоимостью по сравнению с кристаллическими металлами.

Вещества, в которых имеют место значительные МЭ эффекты, могут найти применение в качестве датчиков полей, СВЧ-аттенюаторов, а также в устройствах для записи. В настоящее время накоплен огромный экспериментальный материал о физических свойствах мультиферроиков. Анализ существующих данных показал, что на сегодняшний день большая часть экспериментальных работ посвящена прямому магнитоэлектрическому эффекту. Однако проблема влияния электрического поля на магнитное состояние магнитных материалов по-прежнему заслуживает активного изучения.

Целью данной работы является магнитооптическое изучение обратного магнитоэлектрического эффекта в двухслойном композитном образце, состоящем из пьезоэлектрической $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ пластины и аморфной FeSiBNbCu ферромагнитной ленты.

Глава 1. Обзор литературы

1.1 Магнитоэлектрический эффект

В последние годы большое внимание уделяется исследованию магнитоэлектрических (МЭ) эффектов – связи между электрическим и магнитным полями в веществе. Это направление берёт начало с исследований Рентгена в 1888 г. Им было обнаружено, что движущийся диэлектрик, помещённый в магнитное поле, изменяет свою намагниченность

[1]. Существование обратного эффекта было установлено в 1905 г. [2]. В 1894 г. П. Кюри предположил возможность существования в одном кристалле магнитного и электрического упорядочения [3]. В 1956 г. Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц теоретически обосновали существование магнитоэлектрического эффекта [4]. Этот эффект описывается членом, входящим в формулу для свободной энергии, линейным как по электрическому, так и по магнитному полю:

$$\Phi_{\text{МЭ}} = -\alpha_{ik} E_i H_k$$

Намагниченность и поляризация выражаются через частные производные от свободной энергии:

$$M_k = -\frac{\partial \Phi}{\partial H_k}, P_i = -\frac{\partial \Phi}{\partial E_i}$$

Таким образом, при $H = 0$ электрическое поле создаёт в веществе намагниченность

$$M_k = \alpha_{ik} E_i$$

а при $E = 0$ магнитное поле создаёт электрическую поляризацию

$$P_i = \alpha_{ik} H_k$$

В 1959 г. И.Е. Дзялошинским была теоретически доказана возможность существования классов кристаллов, для которых $\alpha_{ik} \neq 0$ [5]. Было показано, что МЭ эффект допускается лишь в материалах с определёнными классами магнитной симметрии. В частности, кристалл должен быть инвариантен относительно типов инверсий I и R, где I – пространственная, R – временная инверсия. Согласно работе [6], магнитоэлектрический эффект в кристаллах обусловлен влиянием внешних воздействий на энергию обменных и спин-орбитальных взаимодействий, связывающих пространственное движение электронов и взаимную ориентацию их магнитных моментов.

Экспериментально магнитоэлектрический эффект впервые наблюдал Д.Н. Астров в 1960 г. [7]. Им было зарегистрировано изменение

намагниченности монокристалла Cr_2O_3 под действием переменного электрического поля, то есть был обнаружен обратный МЭ эффект.

Дальнейшие исследования показали, что однофазные магнитоэлектрические кристаллы естественного происхождения встречаются редко, и МЭ эффекты в них относительно слабые и проявляются при низких температурах, что ограничивает их практическое применение. Вместе с тем в композитных мультиферроиках, полученных в результате соединения пьезоэлектрической и магнитоэлектрической фаз, могут возникать достаточно большие магнитоэлектрические отклики при температурах выше комнатной.

Идея магнитоэлектрических двухфазных композитных материалов была предложена van Suchtelen в 1972 г. [8]. МЭ эффект в композитах относится к так называемым умножаемым свойствам материалов. Сегнетоэлектрическая и ферромагнитная фазы по отдельности не проявляют магнитоэлектрических свойств. Однако в композитах, содержащих магнитоэлектрическую и пьезоэлектрическую компоненты, которые связаны между собой с помощью упругого механического взаимодействия, могут наблюдаться значительные по величине магнитоэлектрические эффекты.

Механизм прямого МЭ эффекта в композите состоит в следующем. Магнитное поле H вследствие прямой магнитоэлектрической связи вызывает деформацию ферромагнитной компоненты композита, которая передается пьезоэлектрической компоненте композита благодаря механической связи между ферромагнитными и пьезоэлектрическими компонентами. В результате прямого пьезоэлектрического эффекта в пьезоэлектрической компоненте композита возникает поляризация.

Соответственно, возможен и обратный МЭ эффект. Приложенное к пьезоэлектрической компоненте композита напряжение U вследствие обратного пьезоэлектрического эффекта вызывает деформацию пьезоэлектрической компоненты, которая из-за механической связи между пьезоэлектрическими и ферромагнитными компонентами композита

передаётся ферромагнитной компоненте и приводит в результате обратной магнитострикции к изменению намагниченности M композита. При изготовлении слоистых композитов пьезоэлектрическую пластину вырезают таким образом, чтобы под действием электрического поля она деформировалась в требуемом для проведения эксперимента направлении.

В дальнейшем идея создания композитных МЭ материалов с магнитострикционной и пьезоэлектрической компонентами была использована многими экспериментаторами. В частности, авторами статьи [9] были изготовлены соединения $BaTiO_3-CoFe_2O_4$. Было найдено, что для указанного выше композита коэффициент прямого МЭ эффекта, E / H , при комнатной температуре равен $0.13 \text{ В} / (\text{см} \cdot \text{Э})$. Следует отметить, что обнаруженный МЭ эффект в сотни раз превышал эффекты в однофазных МЭ кристаллах.

Композитные материалы могут иметь различную структуру. Наиболее распространёнными являются структуры следующих типов: композиты из гранул одной фазы в матрице другой (рис. 1 а); композиты из слоёв двух фаз (рис. 1 б); структуры, состоящие из столбиков одной фазы, включённых в матрицу другой фазы (рис. 1 в).

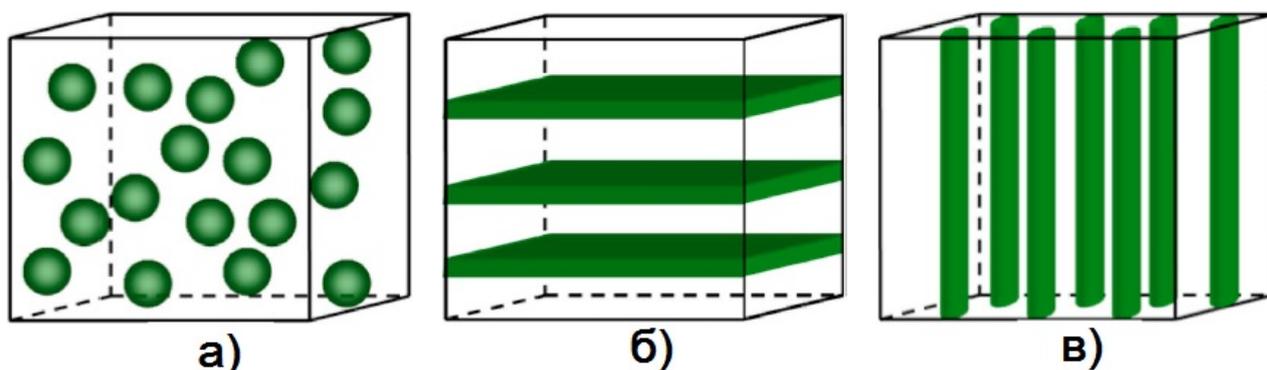


Рисунок 1 – Различные типы композитов: а - тип 0-3, б - тип 2-2, в – тип 1-3 [10].

МЭ эффекты в композитах зависят от следующих факторов:

1. Характеристики компонент композита: магнитострикционные и пьезоэлектрические коэффициенты, диэлектрические и магнитные проницаемости, модули Юнга.
2. Тип композита, формы и размеры его компонент.
3. Величина и направление внешних электрического и магнитного полей.
4. Температура, внешние воздействия.
5. Особенности изготовления композитов, в частности качество механической связи между его компонентами.

1.1.1 Применение магнитоэлектрических материалов

На МЭ эффекте основано устройство датчика переменного магнитного поля, схематическое изображение которого представлено на рис. 2.

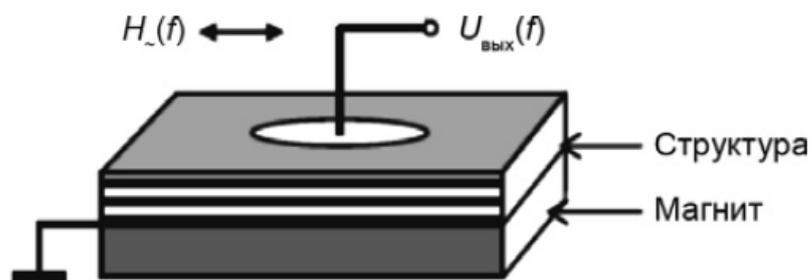


Рисунок 2 – Датчик переменного магнитного поля [6].

Датчик состоит из многослойной композитной плёночной структуры с металлическими электродами и магнита, который создаёт касательное магнитное поле смещения для обеспечения максимальной чувствительности. При помещении такого датчика в переменное магнитное поле $H_{\sim}(f)$ с частотой f в нем возникает выходное напряжение $U_{\text{вых}}(f)$, пропорциональное измеряемому полю. Высокая чувствительность – вплоть до 500 В / Тл (в отличие, например, от 0.02–5 В / Тл у датчика Холла) является его основным преимуществом по сравнению с другими датчиками. Кроме того, он не

требует дополнительного источника питания и обладает более высокой радиационной стойкостью.

Магнитоэлектрический эффект может использоваться в трансформаторе напряжения. Схематическое изображение трансформатора напряжения приведено на рис. 3.

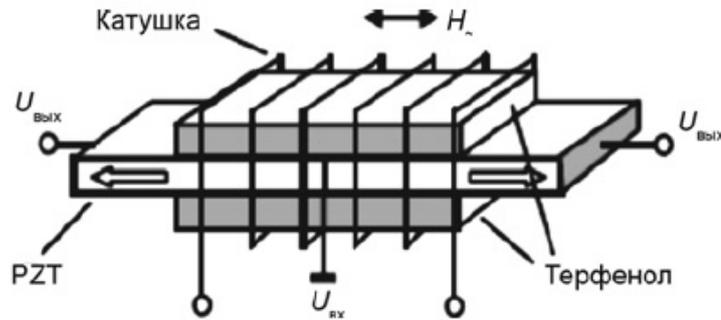


Рисунок 3 – Конструкция трансформатора напряжения [6].

Трансформатор содержит трёхслойную МЭ структуру (Терфенол-D – PZT – Терфенол-D), на которую намотано N витков катушки индуктивности. Для обеспечения максимума МЭ преобразования трансформатор помещается в продольное постоянное магнитное поле. Поданное на катушку переменное входное напряжение $U_{вх}(f)$ создаёт переменное магнитное поле $H_{\sim}(f)$, которое, благодаря прямому МЭ эффекту, приводит к генерации переменного выходного напряжения $U_{вых}(f)$, снимаемого с обкладок пьезопластины PZT.

Обратный магнитоэлектрический эффект полей представляет большой интерес для развития спинтроники [11]. Запись информации в элементах MRAM (magnetoresistive random-access memory – магниторезистивная оперативная память) путём приложения магнитных полей требует сложную структуру элементов, а также большие затраты энергии, которые на сегодняшний день являются слишком большими для широкого внедрения MRAM. Это способствовало активному поиску способов изменения направления намагниченности с меньшими затратами при помощи электрического поля. Устройства памяти, основанные на МЭ эффекте, изменяют своё состояние при приложении напряжения, а не при пропускании

токов, что даёт возможность снизить потребляемую энергию. Кроме того, такие устройства позволяют реализовать четыре стабильных состояния в ячейке памяти вместо двух. В частности, помимо 2-х направлений намагниченности в ферромагнитном слое существуют еще два направления поляризации пьезоэлектрика.

1.2 Аморфные магнитные материалы

Аморфные магнитные материалы (АММ) представляют собой вещества, в которых магнитная атомная структура, например, ферромагнитная, сочетается с аморфной атомной структурой. Аморфными называются вещества, структура которых характеризуется отсутствием дальнего порядка и наличием ближнего порядка в расположении атомов. Дальним порядком называется периодичность в расположении атомов. Под ближним порядком понимается порядок, сохраняющийся на нескольких межатомных расстояниях. В простейшем случае он проявляется в том, что некоторые значения межатомного расстояния встречаются в веществе чаще, чем другие [12].

Аморфные материалы могут проявлять ферромагнитные свойства благодаря наличию в них атомов переходных металлов с незаполненной 3d-оболочкой – железа, кобальта и никеля. 3d-электроны этих металлов являются носителями локальных магнитных моментов в атоме. Обменное взаимодействие между локальными магнитными моментами приводит к появлению спонтанной намагниченности. При удалении локальных магнитных моментов атомов на достаточно большое расстояние друг от друга, что обычно реализуется в «разбавленных» сплавах, взаимодействие между ними отсутствует и сплав становится парамагнитным.

В 1960 г. А. Губанов теоретически обосновал возможность существования ферромагнетизма в аморфных телах [13]. В работе было показано, что для упорядочения магнитных моментов атомов регулярность и симметрия атомных конфигураций необязательны.

Активные исследования аморфных металлов начались в 1970-х годах. Интерес к ним был вызван их такими свойствами, как высокая пластичность и прочность по сравнению с аналогами-кристаллами, коррозионная стойкость, высокая магнитная индукция насыщения, низкая коэрцитивная сила, высокая магнитострикция [14].

Как и для кристаллических ферромагнетиков, для АММ характерно явление гистерезиса, магнитного насыщения и наличие доменной структуры. Несмотря на отсутствие дальнего порядка, аморфным магнитным материалам свойственно наличие магнитной анизотропии. Основные причины магнитной анизотропии в аморфных сплавах, приведённые ниже, были описаны в работе [15]:

1. Магнитное диполь-дипольное взаимодействие, с которым связаны анизотропия формы образца (обусловленная не только его формой, но и состоянием поверхности), внутренняя анизотропия формы (обусловленная анизотропией формы внутренних неоднородностей) и анизотропия упорядочения атомов.
2. Спин-орбитальное взаимодействие, приводящее к одноионной анизотропии и анизотропии обменного взаимодействия.
3. Магнитоупругая энергия, возникающая благодаря магнитострикции при наличии внутренних механических напряжений.

Основной вклад в магнитную анизотропию даёт магнитоупругая энергия, которая определяется соотношением:

$$E_{\sigma} = -\frac{3}{2} \lambda_s \sigma \cos^2 \theta ,$$

где λ_s – магнитострикция насыщения, σ – растягивающее напряжение, θ – угол между направлением σ и вектором спонтанной намагниченности.

Для использования в электронных и электромагнитных устройствах требуются аморфные магнитные сплавы как с высокой, так и с нулевой магнитострикцией. Например, для различных датчиков и магнитоупругих

преобразователей требуются материалы с большим значением λ_s . Для приборов и устройств, работающих на высоких частотах, требуются материалы с низкой магнитострикцией, поскольку магнитоупругие эффекты ухудшают магнитомягкие свойства.

Значение магнитострикции насыщения λ_s сильно зависит от состава сплава и может изменяться в широких пределах. Наиболее высокими значениями, так же как и в кристаллическом состоянии, обладают аморфные магнитные сплавы на основе редкоземельных элементов. Для Fe-обогащённых сплавов магнитострикция насыщения, как правило, положительна, а для Co-содержащих сплавов λ_s принимает отрицательные значения. На основе кобальта и железа были получены сплавы с нулевой магнитострикцией. Линейная магнитострикция λ_s (относительное удлинение образца $\frac{\Delta l}{l}$ в направлении приложенного магнитного поля) для железосодержащих сплавов порядка $10 \cdot 10^{-6}$. Экспериментальные исследования различных аморфных сплавов на основе железа показали, что магнитоупругие эффекты, приводящие к увеличению объёма с ростом намагниченности, могут превзойти тепловое расширение в широком интервале температур [16].

Изготовление аморфных сплавов проще и имеет меньшую стоимость по сравнению с кристаллами, при этом их магнитные свойства не уступают свойствам кристаллических металлов. Основные методы получения аморфных структур можно разделить на три группы:

1. Осаждение металла из газовой фазы (вакуумное напыление, распыление, химические реакции в газовой фазе).
2. Затвердевание жидкого металла (различные методы закалки из жидкого состояния).
3. Введение дефектов в металлический кристалл (облучение частицами поверхности кристалла, воздействие ударной волной).

Широкое распространение получил аморфный сплав FeSiBNbCu, запатентованный под названием Finemet. Этот магнитомягкий сплав был впервые получен Yushizawa и др. в 1988 г. [17]. По сравнению с другими магнитомягкими сплавами (Si-обогащёнными сталями, Fe- и Co-обогащёнными аморфными сплавами, пермаллоями и ферритами) Finemet проявляет наилучшие магнитомягкие свойствами, то есть имеет высокую магнитную восприимчивость, обладая при этом большой индукцией насыщения. Кроме того, было обнаружено, что свойства Finemet можно варьировать при помощи отжига или замещения его компонентов. В связи с этим исследования физических свойств этого сплава ведутся вплоть до настоящего времени.

1.3 PZT-материалы

Цирконат-титанат свинца ($\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$) PZT-соединения, появившиеся в 1950-х годах, были впервые получены Н. Jaffe [18]. PZT являются сегнетоэлектриками, то есть пьезоэлектриками, обладающими спонтанной поляризацией, которая может изменять ориентацию во внешнем электрическом поле. Сегнетоэлектрики состоят из областей (доменов) с одинаковым направлением поляризации. Во всех сегнетоэлектрических материалах имеют место пьезоэффект и пирозэффект – изменение поляризации под действием температуры (см. рис. 4).

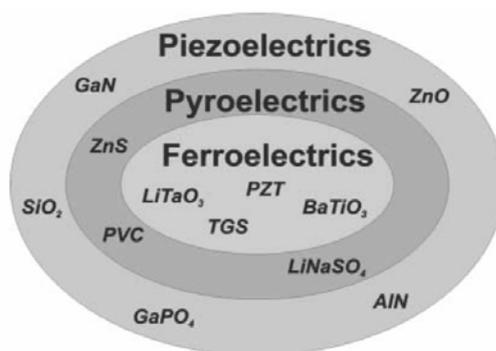


Рисунок 4 – Положение материалов-сегнетоэлектриков (ferroelectrics) по отношению к пьезоэлектрикам (piezoelectrics) и пирозэлектрикам (pyroelectrics).

Сегнетоэлектрики могут использоваться в качестве датчиков полей, так как они имеют как спонтанную, так и наведённую поляризацию и могут проявлять гораздо больший пьезоэлектрический эффект по сравнению с остальными пьезоэлектриками. Керамические соединения-сегнетоэлектрики используются во многих устройствах в качестве материала с высокой диэлектрической проницаемостью. В частности, они применяются в многослойных конденсаторах, в электрооптической керамике, в пирозлектрических детекторах.

PZT имеют структуру перовскита. Общая формула для кислородсодержащих октаэдрических перовскитов-сегнетоэлектриков – ABO_3 . Элементарная ячейка – кубическая, А-катионы (Pb^{2+}) находятся в углах куба, В-катионы (Ti^{4+} , Zr^{4+}) – в центре куба, анионы O^{2-} расположены на гранях куба и образуют октаэдр вокруг В-катиона (см. приведённый для иллюстрации рис. 5).

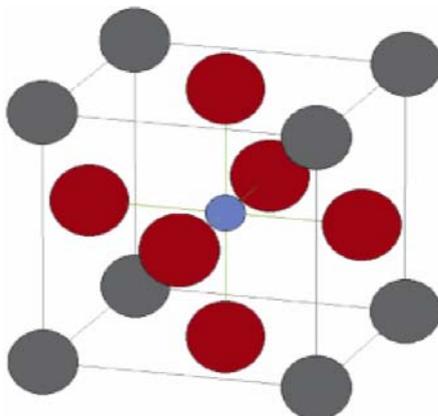


Рисунок 5 – Структура PZT. Серым цветом обозначены катионы Pb, красным - анионы O, голубым - катионы Ti, Zr.

Глава 2. Методика эксперимента

2.1 Изучаемый образец

Объектом исследования была двухслойная композитная структура, состоящая из аморфной ленты FeSiBNbCu (Finemet) (верхний слой), жёстко закрепленной на пьезоэлектрической пластине Pb(Zr,Ti)O₃ (PZT) (рис. 6). Толщины магнитного и пьезоэлектрического слоёв были равны 30 и 200 мкм, соответственно. Длина образца составляла 8.5 мм, ширина – 4 мм.

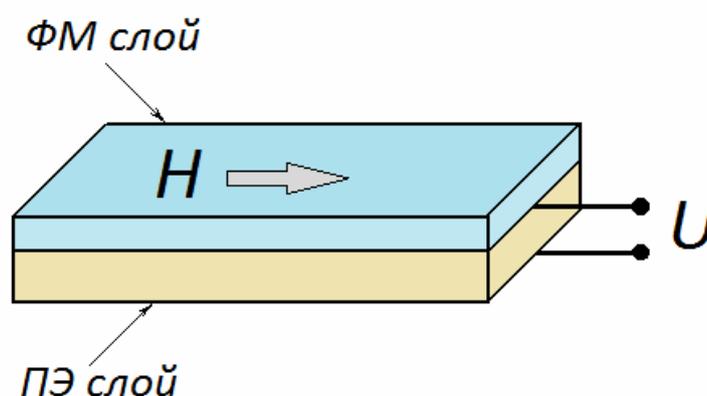


Рисунок 6 – Схема изучаемого образца.

2.2 Методика эксперимента

Для изучения обратного МЭ эффекта к пьезоэлектрической пластине прикладывалось электрическое напряжение U различной величины (75, 100, 160, 200 В). Для исходного состояния образца и при каждом значении напряжения U для аморфной ленты измерялись локальные кривые намагничивания. По изменению хода кривых намагничивания при $U \neq 0$ оценивалась величина МЭ эффекта.

Кривые намагничивания были измерены на магнитооптической установке с помощью экваториального эффекта Керра (ЭЭК). Диаметр приповерхностных измеряемых участков был равен 1 мм. Магнитное поле было H приложено перпендикулярно плоскости падения света. В первом случае H было направлено параллельно длинной стороне образца, во втором

– перпендикулярно. Предварительные измерения кривых намагничивания при $U = 0$ показали, что поле насыщения H_S аморфного слоя в магнитном поле, приложенном параллельно длинной стороне образца, меньше, чем в перпендикулярном поле. Это означает, что ось лёгкого намагничивания аморфного слоя совпадает с его длиной, что обусловлено положительным значением магнитострикции λ_S . Здесь нельзя также исключить влияние формы магнитного слоя. Уменьшение ширины аморфного слоя по сравнению с длиной сопровождается увеличением размагничивающего фактора в поперечном направлении, и как следствие этого, увеличением поля насыщения в перпендикулярном направлении.

Чтобы исключить влияние краевых эффектов, измерения кривых намагничивания были выполнены в центре образца.

Изменение магнитной индукции образца ΔB за счёт МЭ эффекта при каждом значении перемагничивающего поля H оценивалось как разность значений B при $U \neq 0$ и $U = 0$:

$$\Delta B(H) = B(H, U \neq 0) - B(H, U = 0)$$

Коэффициент обратного МЭ эффекта α , согласно [6], определялся по формуле:

$$\alpha = \Delta B/E = \Delta B/(U/d), \text{ [Гс} \cdot \text{см/V]}, \quad (1)$$

где E – величина напряжённости электрического поля, приложенного к образцу, d – толщина образца.

Для количественной оценки величины МЭ эффекта была измерена петля гистерезиса аморфных лент и определена их индукция насыщения B_S . Измерения были выполнены на вибрационном магнитометре фирмы «Lake Shore VSM 7400».

2.2.1 Магнитооптическая установка

Измерения приповерхностных магнитных характеристик изучаемых образцов были выполнены на модернизированной магнитооптической установке, собранной на базе микроскопа МИС-11 (магнитооптический микромагнитометр). Блок схема установки приведена на рис. 7.

Свет от источника света ИС (в данном случае лампа К-12, питаемая от стабилизированного источника питания) проходит через поляризатор П и с помощью системы линз L_1 первого тубуса микроскопа фокусируется на образец О, расположенный между полюсами электромагнита. Угол падения света на образец равен 45° . Размер локального участка поверхности изучаемого образца определяется диаметром полевой диафрагмы, расположенной в первом тубусе микроскопа. С учетом возможного изменения увеличения микроскопа диаметр светового пятна на образце может варьироваться от нескольких миллиметров до нескольких десятков микрон. Толщина изучаемого приповерхностного слоя в данном случае была порядка 20 нм. Отражённый от образца свет системой линз L_2 второго тубуса собирается в плоскости изображения микроскопа, где расположен приёмник излучения ФП (германиевый фотодиод).

Электрический сигнал, пропорциональный интенсивности падающего на фотодиод света, поступает на вход измерительной системы. В работе использовался модуляционный метод регистрации магнитооптических эффектов. Преимущество данного метода заключается в том, что его применение позволяет устранить влияние колебаний интенсивности источника света, влияние флуктуаций фототока, и в силу того, что он является дифференциальным, его чувствительность увеличивается по сравнению со статическим методом на 2-3 порядка, то есть возможно измерение относительного изменения интенсивности отражённого света от перемагничиваемого образца вплоть до 10^{-4} - 10^{-5} .

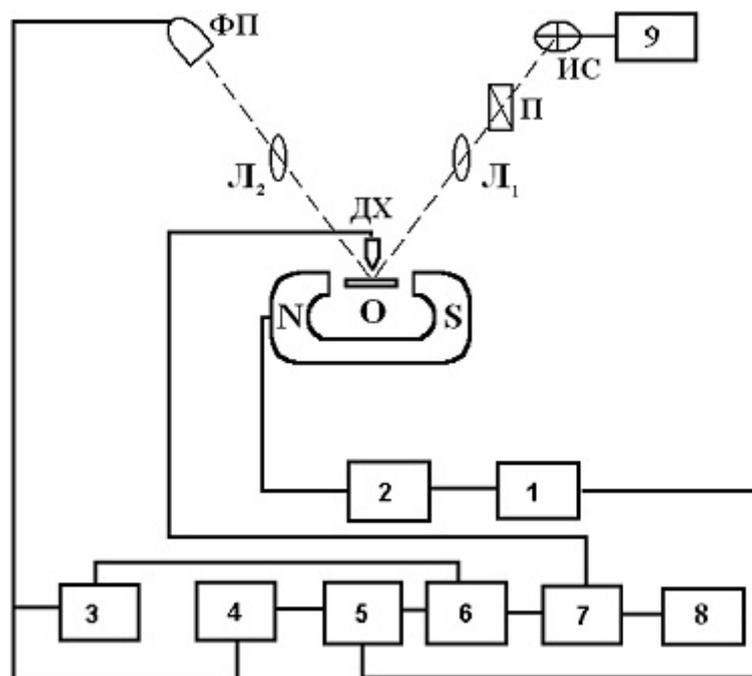


Рисунок 7 – Блок-схема магнитооптической установки, созданной на базе микроскопа МИС-11.

1. Генератор звуковых частот ЗГ-102.
2. Усилитель мощности УМ-50.
3. Микровольтметр постоянного тока В2-11.
4. Селективный усилитель У2-8.
5. Синхронный детектор СД-1.
6. Блок деления.
7. Аналого-цифровой преобразователь Е-24.
8. Персональный компьютер.
9. Блок питания лампы.

ИС – источник света.

П – поляризатор.

Л₁ – система линз первого тубуса.

Л₂ – система линз второго тубуса.

О – образец.

ДХ – датчик Холла.

ФП – фотоприёмник.

Исследуемый образец с помощью магнита перемагничивается переменным магнитным полем с частотой $f = 80$ Гц. Питание магнита осуществляется от генератора низких частот ЗГ-102 через усилитель мощности УМ-50, соединённых по схеме резонансного включения. Изменение намагниченности засвеченного участка поверхности под действием периодически изменяющегося внешнего магнитного поля приводит к изменению интенсивности света за счёт магнитооптического эффекта. Это изменение интенсивности регистрируется фотоприёмником. В цепи приёмника излучения возникают два сигнала:

– постоянное напряжение U_0 , пропорциональное интенсивности I_0 света, отражённого от образца в отсутствие магнитного поля,

– переменное напряжение U_m , пропорциональное глубине модуляции интенсивности отражённого от образца света ΔI с частотой f за счёт магнитооптического эффекта при изменении намагниченности образца от M до $-M$. $\Delta I = (I - I_0) \propto \Delta M$, где I – интенсивность света, отражённого от намагниченного образца.

Значения U_0 и U_m определяют знак и величину магнитооптического эффекта, который рассчитывается по формуле:

$$\delta = \sqrt{2} U_m / U_0$$

Постоянное напряжение U_0 измеряется микровольтметром постоянного тока В2-11, а переменное напряжение U_m – усилителем-преобразователем У2-8 с синхронным детектором СД-1. Роль детектора сводится к подавлению сигналов с частотой следования, отличающейся от частоты опорного сигнала, задаваемого генератором ЗГ-102, и к регистрации изменения фазы сигнала. С выхода СД-1 и В2-11 сигналы подаются на вход блока деления. С блока деления сигнал, пропорциональный отношению переменной и постоянной составляющих интенсивности отражённого света, подаётся на вход АЦП Е-24. Фактически в данном случае регистрируется относительное изменение интенсивности отражённого света при изменении

амплитуды перемагничивающего изучаемый образец поля. На второй вход АЦП подаётся напряжение, пропорциональное напряжённости магнитного поля в зазоре электромагнита. Магнитное поле регистрируется датчиком Холла, закреплённым между тубусами микроскопа таким образом, чтобы фиксировать значения поля на участке проведения измерения. Указанные сигналы с АЦП поступают на компьютер, где они регистрируются с помощью программы «Power Graph». Дальнейшая обработка результатов производится с использованием специальной программы, пересчитывающей измеряемые величины в зависимости приведённых значений намагниченности M/M_S (M_S - намагниченность насыщения) от величины H , то есть измерялись зависимости $\delta(H)/\delta_S \propto M(H)/M_S$ (δ_S – значение ЭЭК при $M = M_S$) при изменении внешнего магнитного поля H .

Изучаемые образцы вместе с электромагнитом устанавливались на предметном столике микроскопа, снабжённом двумя микроподачами, позволяющими перемещать образец в двух взаимно перпендикулярных направлениях с точностью до ± 5 мкм при увеличении 500. Поляризация света осуществлялась с помощью поляризатора Глана-Томпсона (степень поляризации $\sim 10^{-4}$), снабжённого лимбом, позволяющим выставлять угол поляризации с точностью $\sim 0.5^\circ$.

Основные технические данные установки:

- 1) минимальная величина регистрируемого относительного изменения интенсивности отражённого от перемагничиваемого образца света составляет 5×10^{-5} ;
- 2) минимальный диаметр изучаемого локального участка образца с учётом увеличения микроскопа равен 20 мкм.

Приповерхностные магнитные свойства для изучаемых образцов были измерены на вышеописанной установке с помощью экваториально эффекта Керра (ЭЭК), δ . В случае ЭЭК магнитное поле приложено параллельно поверхности образца и перпендикулярно плоскости падения света.

2.2.2 Анализ погрешностей эксперимента

Погрешности эксперимента бывают двух видов – случайные и систематические.

Случайные ошибки могут быть обусловлены как самой измерительной установкой, так и влиянием внешних условий (вибрации, колебания температуры и т.д.). Многократные измерения одной и той же величины позволяют уменьшить влияние этого класса погрешностей. При наших измерениях случайная ошибка не превышала 2%.

К основным источникам систематических погрешностей, которые существуют при измерении магнитооптических эффектов, относятся:

1. Появление шумов в измерительной системе, вносимых электромагнитными наводками на сетевой частоте $f = 50$ Гц. Уменьшение этих наводок достигалось за счёт проведения измерений на частоте $f = 80$ Гц. Для устранения резонансных наводок, индуцированных сигналом в цепи намагничивания с частотой звукового генератора, проводилось тщательное заземление всех измерительных приборов. Фотоприёмник помещался в кожух из мягкого железа и удалялся на максимальное расстояние от звукового генератора и магнита. Для уменьшения полей рассеяния магнит был изготовлен в форме тороида. Вместе с тем уровень шумов и наводок экспериментальной установки постоянно контролировался. При измерении ЭЭК этот контроль осуществлялся по оценке величины эффекта на s-компоненте падающего света, поскольку для гироэлектрических сред величина ЭЭК на p-компоненте на два порядка больше, чем на s-компоненте. Таким образом, поворот поляризатора на 90° от p- к s-компоненте позволял оценить уровень шумов системы. Настройка считалась удовлетворительной, если величина δ_s не превышала 1% от величины δ_p .

2. Неточная настройка оптической системы установки. Степень поляризации света для используемых нами поляризаторов Глана-Томпсона составляла 10^{-4} , и поэтому этой погрешностью можно пренебречь.
3. Класс точности используемых приборов. К систематическим ошибкам приводят колебания коэффициента усиления усилителя и синхронного детектора. Эта ошибка определяется классом точности прибора и составляет 2 %. Для уменьшения этой ошибки усилитель периодически настраивался, а величина коэффициента усиления контролировалась внешним измерителем напряжения. Измерение постоянной составляющей сигнала проводилось с точностью до 0.1 мВ.

В целом, общая ошибка эксперимента не превышала 2 %.

Глава 3. Полученные результаты и их обсуждение

Чтобы оценить качество поверхности используемой в изучаемом композитном образце аморфной ленты и убедиться, что полученные в дальнейшем результаты не являются следствием дефектности аморфного слоя, предварительно были измерены локальные кривые намагничивания для нескольких приповерхностных локальных участков образца (см. рис. 8). Диаметр приповерхностного участка образца, для которого регистрировался магнитооптический сигнал, был равен 1 мм. В основном измерения были выполнены для центральной области образца (см. кривые 1, 3–5), а также, для иллюстрации, на краю образца (кривая 2).

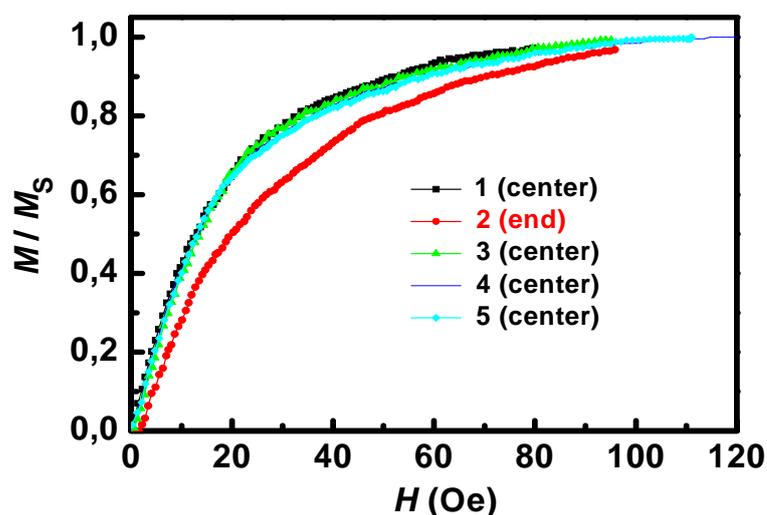


Рисунок 8 – Кривые намагничивания, измеренные для разных приповерхностных участков аморфной ленты.

Анализ полученных данных показал, что кривые намагничивания, измеренные в центральной части образца, в пределах ошибки эксперимента совпадают.

На рис. 9 представлена петля гистерезиса, измеренная для аморфной ленты на вибрационном магнитометре.

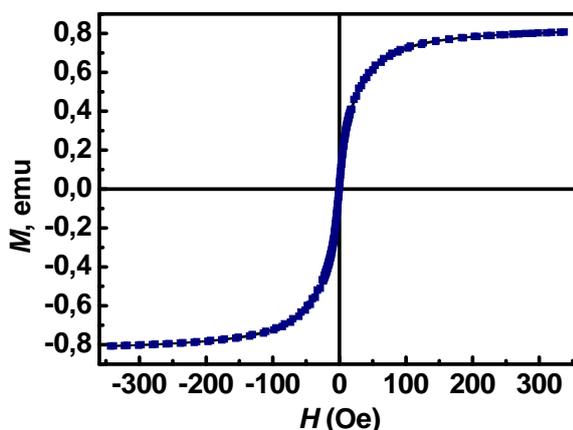


Рисунок 9 – Петля гистерезиса, наблюдаемая для аморфной ленты в магнитном поле, приложенном параллельно длинной стороне.

Используя выше приведённые данные и размеры образца, было найдено значение индукции насыщения аморфной ленты: $B_s = 10472$ Гс.

На рис. 10 и 11 представлены кривые намагничивания аморфной ленты образца при приложении к пьезоэлектрической пластине электрического напряжения различной величины при двух ориентациях перемагничивающего поля H . Для наглядности слева на рис. 10 и 11 приведены начальные участки кривых намагничивания.

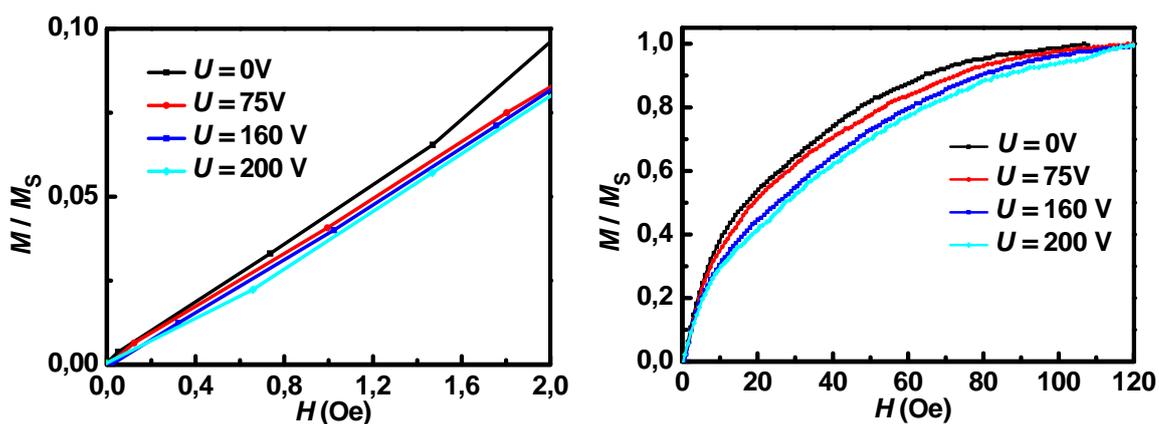


Рисунок 10 – Кривые намагничивания композитного образца при приложении электрического напряжения различной величины. Перемагничивающее поле H направлено параллельно длинной стороне образца.

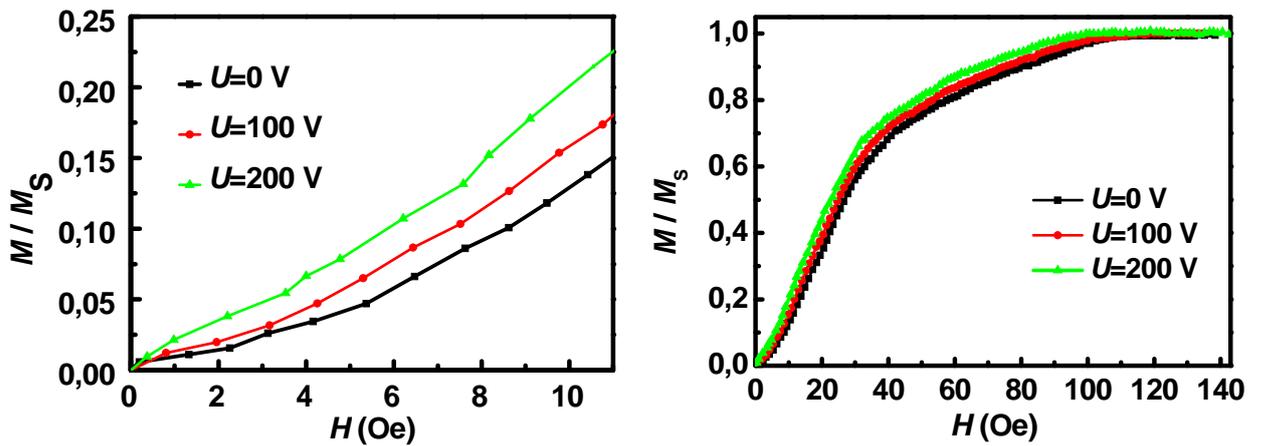


Рисунок 11 – Кривые намагничивания композитного образца при приложении электрического напряжения различной величины. Перемагничивающее поле H перпендикулярно длинной стороне образца.

Анализ выше приведенных данных показывает, что при ориентации H параллельно/перпендикулярно длинной стороне образца, наклон кривых намагничивания уменьшается/увеличивается с ростом приложенного напряжения U .

Зависимости изменения магнитной индукции аморфной ленты ΔB от величины приложенного к образцу магнитного поля H и напряжённости электрического поля E , приложенного к пьезоэлектрической пластине, представлены на рис. 12 и 13.

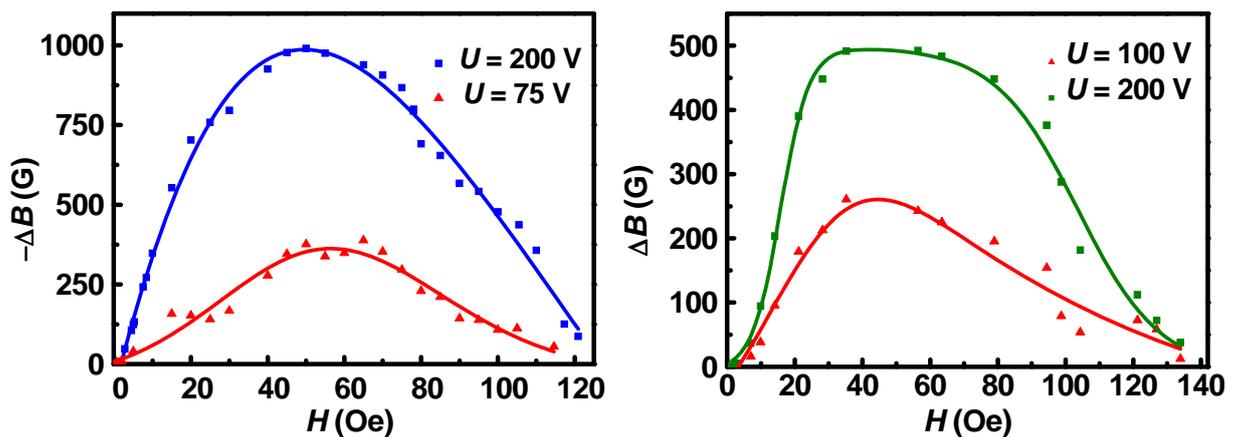


Рисунок 12 – Зависимости изменения магнитной индукции ΔB от напряжённости магнитного поля H . H направлено параллельно (слева) и перпендикулярно (справа) длинной стороне образца.

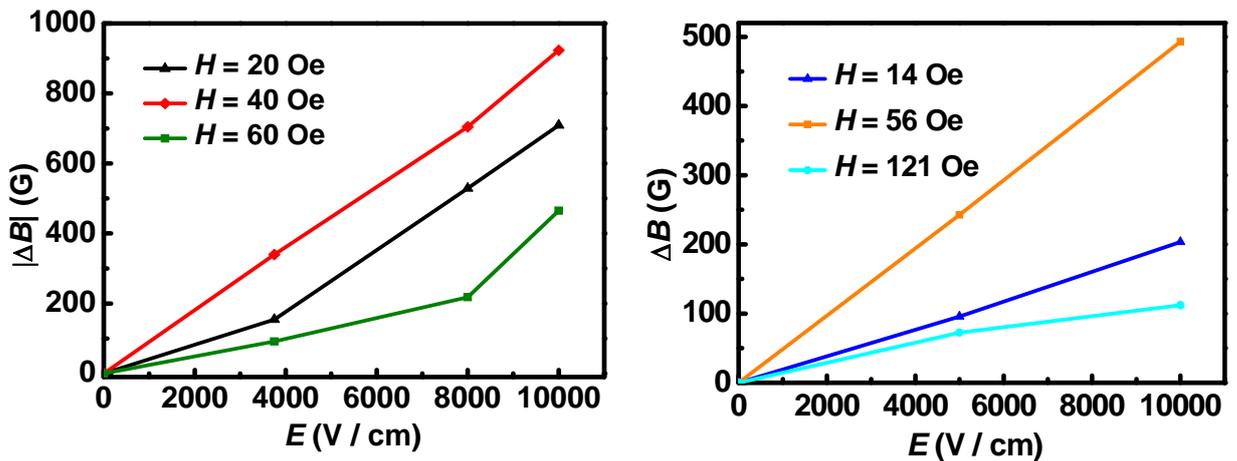


Рисунок 13 – Зависимости изменения магнитной индукции образца ΔB от напряжённости электрического поля E . Перемагничивающее поле H направлено параллельно (слева) и перпендикулярно (справа) длинной стороне образца.

На рис. 14 представлены зависимости коэффициента обратного МЭ эффекта α , определённого по формуле (1), от величины перемагничивающего поля при разных ориентациях H .

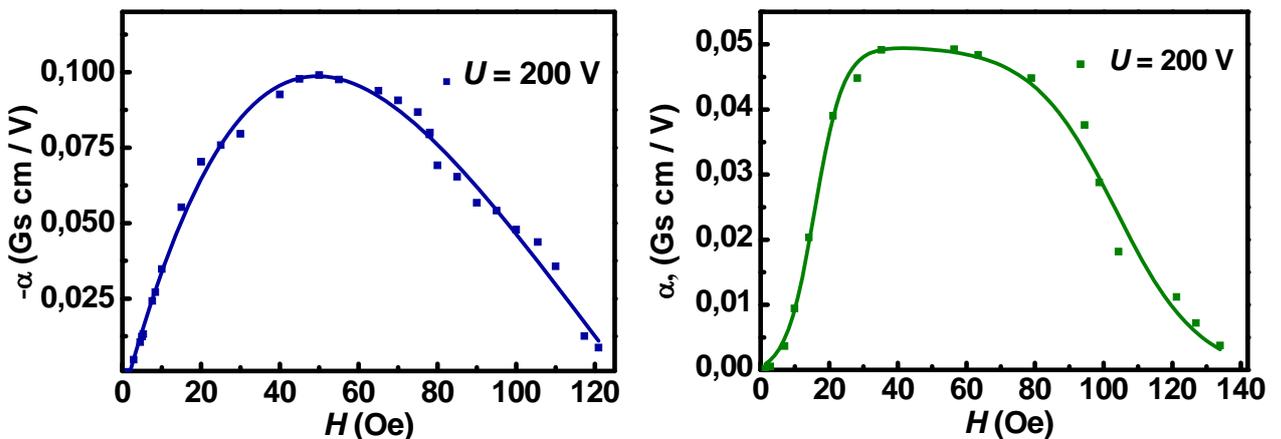


Рисунок 14 – Зависимости коэффициента обратного МЭ эффекта от величины перемагничивающего поля H , приложенного параллельно (слева) и перпендикулярно (справа) длинной стороне образца.

Приведённые на рис. 14 данные показывают, что в первом случае максимальное абсолютное значение обратного МЭ эффекта α равно $0.1 \text{ Гс} \cdot \text{см} / \text{В}$, а во втором случае – $0.049 \text{ Гс} \cdot \text{см} / \text{В}$.

ВЫВОДЫ

1. Постоянное электрическое поле, приложенное к пьезоэлектрической пластине, влияет на магнитные характеристики аморфной ленты.
2. Обратный МЭ эффект имеет разный знак при ориентации перемагничивающего поля H параллельно и перпендикулярно длинной стороне образца.
3. Абсолютное значение обратного МЭ эффекта в зависимости от величины перемагничивающего поля H изменяется от 0 до 0.1 Гс·см / В и от 0 до 0.049 Гс·см / В при ориентации H параллельно и перпендикулярно длинной стороне образца, соответственно.
4. Различие знака обратного МЭ эффекта при перемагничивании образца магнитным полем, приложенном параллельно длинной и короткой стороне образца, обусловлено анизотропией аморфного слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые обратный магнитоэлектрический эффект был обнаружен с использованием магнитооптического метода исследования магнитных материалов. Результаты измерений кривых намагничивания, выполненных с помощью экваториального эффекта Керра, свидетельствовали о зависимости обратного магнитоэлектрического эффекта от величины и ориентации перемагничивающего поля, приложенного к магнитному слою. В частности, установлено, что изменение ориентации перемагничивающего поля H от совпадающего с длинной стороной изучаемого образца к перпендикулярному направлению сопровождается изменением величины и знака обратного МЭ эффекта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Rontgen W.C. // Ueber die durch bewegung eines im homogenen electrischen felde befindlichen dielectricums hervorgerufene electrodynamische kraft // Ann. Phys. 35 (1888) 264-270.
2. Wilson H.A. // On the electric effect of rotating a dielectric in a magnetic Field // Philos.Trans. R. Soc. London, Ser. A, V.204 (1905) 121-137.
3. Curie P. // Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique // J. Phys. 3, Ser. III (1894) 393-415.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
5. Дзялошинский И.Б. // К вопросу о магнитоэлектрическом эффекте в антиферромагнетиках // ЖЭТФ, Т.37 (1959) 881-882.
6. Калгин А.В., Григорьев Е.С., Граби З.Х. // Магнитоэлектрический эффект: история, современное состояние исследований и перспективы применения // Альтернативная энергетика и экология, № 03/2 (122) (2013) 49-63.
7. Астров Д.Н. // Магнитоэлектрический эффект в окиси хрома // ЖЭТФ, Т.40, №4 (1961) 1035-1041.
8. Van Suchtelen J. // Product properties: a new application of composite materials // Philips Res. Rep., 27 (1972) 28-37.
9. Van Den Boomgaard J., Terrell D.R., Born R.A.J., Giller H.F.J.I. // An in situ grown eutectic magnetoelectric composite material // Journal of Material Science, 9 (1974) 1705-1709.
10. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D. and Srinivasan G. // Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // J. of Appl. Phys, 103 (2008) 031101.
11. Fusil S., Garcia V., Barthelemy A., Bibes M. // Magnetoelectric Devices for Spintronics // Annu. Rev. Mater. Res., 44 (2014) 91-116.

12. Петраковский Г.А. // Аморфные магнетики // Успехи физических наук, Т.134, №2 (1981) 305-331.
13. Губанов А.И. // Квазиклассическая теория аморфных ферромагнетиков // ФТТ, Т.2 (1960) 502-505.
14. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К., Аморфные металлы, М.: Металлургия, 1987.
15. Kronmuller H., Fahnle M., Domann M., Grimm H., Grimm R., Groger B. // Magnetic properties of amorphous ferromagnetic alloys // Journal of magnetism and magnetic materials, V.13 (1979) 53-70.
16. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е. // Аморфные металлические сплавы // Успехи физических наук, Т.160 (1990) 75-110.
17. Yoshizawa Y., Oguma S., Yamauchi K. // New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure // J. Appl. Phys., 64 (1988) 6044-6046.
18. Jaffe H. // Piezoelectric ceramics // Journal of the American Ceramic Society, V.41, №11 (1958) 494-498.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю проф., дфмн Шалыгиной Е.Е. за поставленную задачу, содержащую научную новизну, помощь в проведении экспериментальных исследований, неоценимую помощь в ходе написания работы, Харламовой А.М. за помощь в проведении измерений, а также всем сотрудникам кафедры магнетизма за поддержку в ходе обучения.