

ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ

С. В. Дубинко, кандидат физико-математических наук, доцент

Эпитаксиальные пленки феррит-гранатов (ЭПФГ) традиционно рассматриваются как среда для записи и хранения информации. Основными носителями информации в ЭПФГ являются цилиндрические магнитные домены (ЦМД) или линии Блоха, индуцированные в доменных границах [1]. Но ЭПФГ обладают еще свойствами магниточувствительного элемента — датчика, в котором в зависимости от величины и ориентации вектора напряженности внешнего магнитного поля относительно кристаллографических и магнитных осей пленок происходит зарождение доменов различных конфигураций.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности использования ЭПФГ как датчиков магнитных полей для реализации различных задач.

1. Методы измерения характеристик магнитных полей

Основными характеристиками магнитных полей являются напряженность магнитного поля и параметры его неоднородности. В частности, одним из таких параметров служит радиус кривизны силовых линий магнитного поля.

Предлагается вариант датчика магнитного поля, показанный на рис.1 [2]. Луч света от источника 1 вводится устройством 2 в У-образный световод 3 и через него передается на ЭПФГ 4. Свет дифрагирует на регулярной ДС в ЭПФГ, и лучи нулевого порядка дифракции через второй отрезок световода 3 поступают на фотоприемник. Лучи более высоких порядков дифракции рассеиваются в световоде, если для угла дифракции φ выполняется соотношение $|\varphi| > \theta_{\max}$ или $\lambda/d > 2NA$, где θ_{\max} - максимальный угол, под которым распространяется свет в световоде, λ - длина волны источника света 1, NA - числовая апертура световода 3. Интенсивность лучей нулевого порядка дифракции

$$I_0 = I_{\text{пад}} e^{-\alpha t} [((2S-d)/d)^2 \sin^2 Ft + \cos^2 Ft],$$

где $I_{\text{пад}}$ - интенсивность падающих на ЭПФГ лучей, α - коэффициент поглощения ЭПФГ, t - длина пути света в ЭПФГ, S - ширина домена одной полярности в измеряемом поле, d - период ДС в нулевом поле, F - удельное фарадеевское вращение ЭПФГ. При внешнем магнитном поле, равном полю насыщения ЭПФГ, ДС исчезает, интенсивности первого и более высоких порядков дифракции становятся равными нулю, при этом практически весь свет, прошедший через 4, попадает на фотоприемник 5. При изменении внешнего магнитного поля от нуля до поля насыщения пленки 4 интенсивность падающего на фотоприемник 5 света плавно возрастает. Между напряженностью внешнего магнитного поля и сигналом фотоприемника существует однозначная зависимость. Измерение магнитного поля осуществляют путем измерения

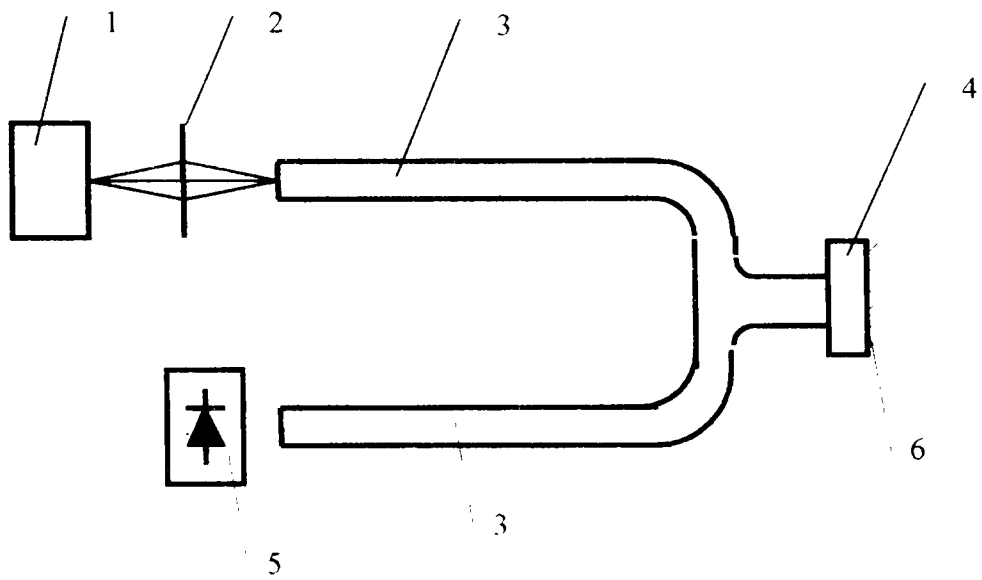


Рис. 1. Оптическая схема датчика магнитного поля

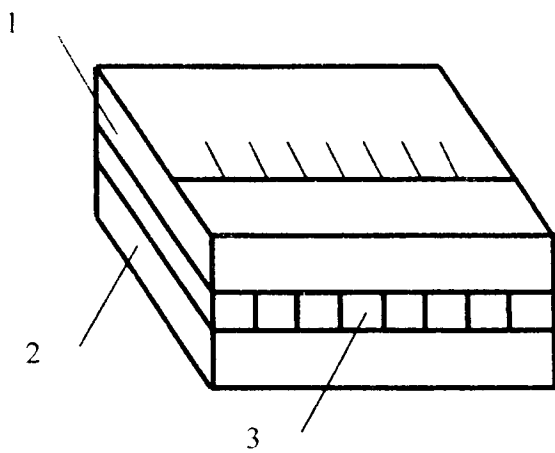


Рис. 2. Схема устройства для измерения напряженности магнитного поля

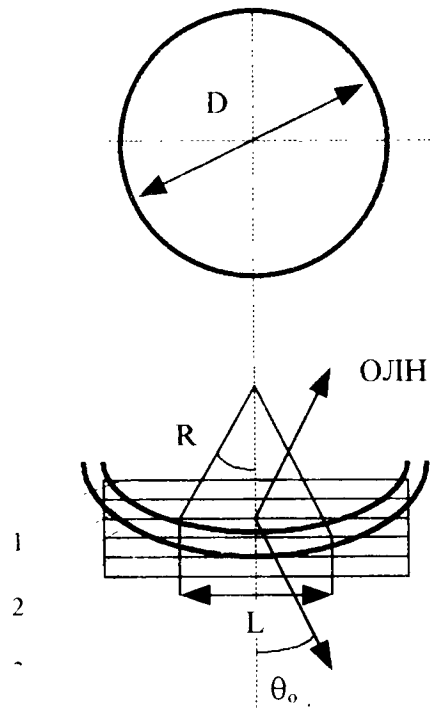


Рис.3. Структурная схема устройства для измерения R

интенсивности падающего на фотоприемник света. Диапазон измеряемых полей определяется полем насыщения ЭПФГ.

Устройство для измерения напряженности магнитного поля предложено в [3], рис.2. Принцип работы устройства заключается в следующем. Для измерения напряженности магнитного поля магниточувствительный элемент вносится в зону измерения. Каждая пленка, входящая в элемент, имеет определенную величину H^* . Измерение напряженности внешнего поля происходит посредством наблюдения за изменением характера ДС в результате воздействия магнитного поля на элемент. В исходном состоянии пленка, входящая в элемент, имеет лабиринтную ДС. В результате воздействия исследуемого магнитного поля на элемент ряд пленок, образующих элемент, перемагничиваются. После вынесения элемента из зоны исследуемого постоянного магнитного поля, а в случае импульсного поля, после прекращения импульса, в пленках, в которых произошло перемагничивание, реализуется ДС путем однородного зарождения. Переход ДС от лабиринтной к ДС, соответствующей однородному зарождению, происходит при строго определенных значениях внешнего магнитного поля, приложенного в плоскости магниточувствительного элемента.

$$H^* = 2K_u(1 - 2/[Q_1(1+Q_1)]^{1/2})\Lambda/M_s h.$$

где $\Lambda = (A/2\pi M_s)^{1/2}$, A - константа обмена, K_u - константа одноосной анизотропии, Q_1 - фактор качества, M_s - намагниченность, h - толщина пленки. Наблюдение ДС осуществляется в оптический микроскоп. Измерение конкретного значения исследуемого магнитного поля производится с помощью наблюдения за границей, разделяющей два типа ДС.

Для определения величины напряженности магнитного поля достаточно иметь размер пленки шириной в десять периодов ДС, поэтому элемент, состоящий из ста пленок, может иметь размер порядка одного миллиметра. Шкала, расположенная на поляризаторе устройства, построена таким образом, что против каждой магнитной пленки, входящей в элемент, нанесено значение напряженности магнитного поля, соответствующего полю однородного зарождения для данной пленки. Такое построение шкалы позволяет оперативно измерять напряженность внешнего поля.

Устройство для измерения радиуса кривизны силовых линий магнитного поля (R) описано в [4]. Предлагаемое устройство (рис.3) содержит магнитооптический активный элемент 2, расположенный между поляризатором 1 и анализатором 2, снабженный шкалой отсчета. Магнитооптический элемент выполнен в виде двух слоев, представляющих собой ЭПФГ с лабиринтной ДС, причем два идентичных магнитных слоя устройства скреплены таким образом, что направление оси легкого намагничивания (ОЛН) одного слоя является зеркальным отображением ОЛН другого слоя, а шкала отсчета наносится на анализатор. Устройство работает следующим образом: при действии на элемент внешнего магнитного поля, превышающего заданный предел (определенный магнитными свойствами элемента), происходит однородное

зарождение ДС в этом объеме элемента, где направление касательной к силовой линии внешнего магнитного поля и ОЛН взаимно перпендикулярны. Ввиду разной ориентации ОЛН в каждом слое элемента, зоны однородного зарождения возникают на расстоянии L друг от друга. Это расстояние зависит от R в плоскости, проходящей через ОЛН обоих слоев, и угла θ_0 . Из рисунка очевидно, что расстояние L есть хорда, стягивающая дугу окружности с центральным углом $2\theta_0$ и радиусом R_0 . Следовательно, радиус кривизны измеряемого поля в заданной плоскости определяется по формуле $R = L/2\text{tg } \theta_0$.

Устройства для измерений напряженности магнитного поля, описанные выше, дополняют друг друга. С помощью первого из них измеряются пороговые значения магнитных полей, другое — позволяет измерять непрерывный ряд значений полей. Магнитооптическому измерению R трудно предложить альтернативу, так как все другие методы предполагают механические перемещения датчиков, что при микронных объемах измеряемых полей сильно снижает точность измерений.

2. Устройства считывания информации с магнитных носителей

Данный раздел посвящен магнитооптическим способам считывания информации.

Устройство для оптического воспроизведения информации с носителя магнитной записи [5] показано на рис.4. Световой поток от лазера 1 направляется во входные торцы подводящих одномодовых световодов 2 узла формирования оптического сигнала и, выйдя из выходных торцов, образует воспроизводящий световой пучок, попадающий на рабочую поверхность ЭПФГ 4. Часть воспроизводящего пучка, попадающая на слой 5 из светопоглощающего материала, расположенный на пленке, поглощается материалом этого слоя. Другая часть пучка после отражения от рабочей поверхности пленки 4 в области щели 6 образует информационный световой пучок и попадает в отводящий многомодовый световод 3. Торцы обоих световодов 2 и 3 установлены под углом α к поверхности пленки 4. Угол определяется из соотношения $\alpha \leq 90^\circ - [\arcsin(1/n_c) + \arcsin(NA/n_c)]$, где n_c - показатель преломления сердцевины световода. Информационный световой поток, дважды пройдя через толщу намагниченной пленки 4, приобретает поворот плоскости поляризации излучения за счет двойного эффекта Фарадея. Величина этого поворота зависит от амплитуды записанного информационного сигнала на носителе магнитной записи 7, далее информационный световой пучок, пройдя через поляризатор фотоприсмного блока, модулируется по амплитуде и попадает на фотоприемник, с которого снимается информационный сигнал, пропорциональный полю рассеивания носителя магнитной записи 7 в области щели 6, ширина которой может быть доведена до 5 мм. В зависимости от типа сигнала, записанного на носителе магнитной записи, электрический сигнал с фотоприемника может быть передан на любое исполнительное устройство.

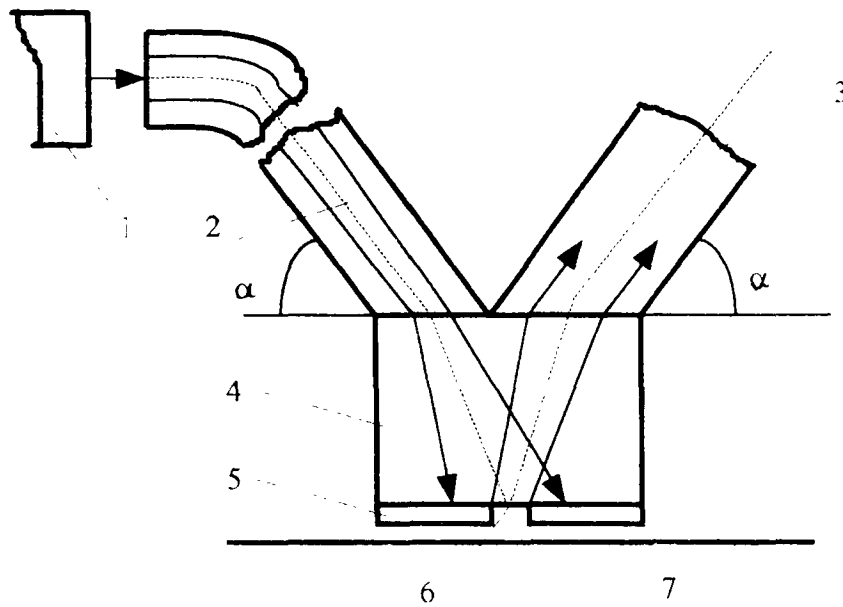


Рис. 4. Схема устройства для оптического воспроизведения информации с магнитного носителя

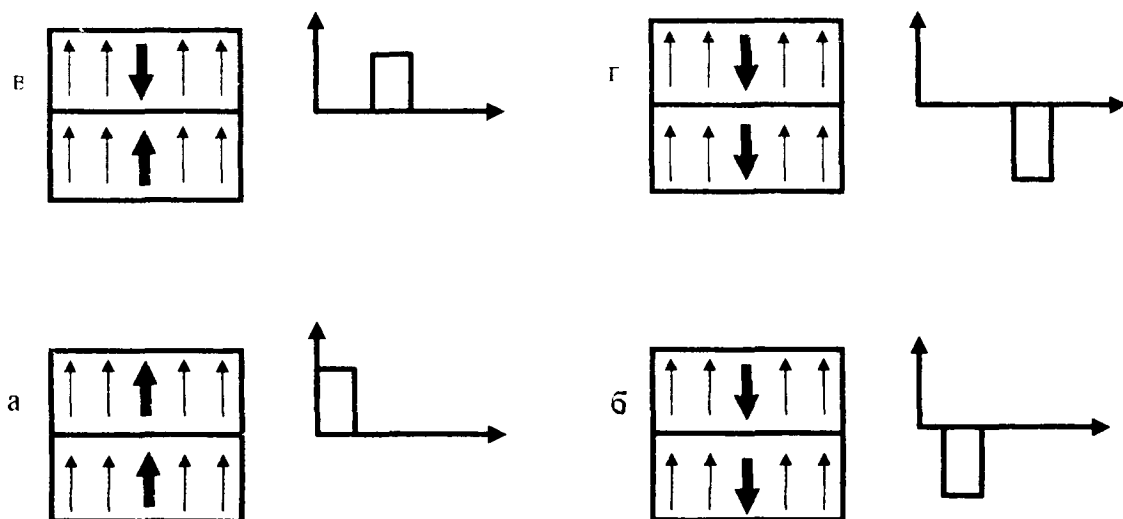


Рис. 5. Схематическое состояние ячеек матрицы записи-выборки в различных фазах работы устройства

Возможен иной вариант устройства для оптического воспроизведения информации [6], в котором световод в устройстве [5] заменен на призму с многослойным диэлектрическим износостойким покрытием.

Рассмотрим запоминающее устройство с произвольной выборкой информации [7]. Матрица записи-выборки выполнена в виде двухслойной ЭПФГ. Внешний слой пленки выращен из материала, имеющего меньшую величину коэрцитивной силы, чем материал внутреннего слоя. На поверхность пленки нанесена система токоведущих шин. В исходном состоянии все ячейки матрицы записи — выборки намагничены в одном направлении (рис. 5а). При записи информации в определенные ячейки матрицы записи-выборки от дешифраторов и подаются импульсы тока, обеспечивающие перемагничивание ячеек внешнего и внутреннего слоев матрицы (рис. 5 б). Затем на матрицу подается токовый сигнал меньшей величины и противоположного направления, позволяющий перемагничивать ячейки только внешнего слоя пленки и сохранить информацию, записанную во внутреннем слое (рис. 5 в). При выборке информации из какой-либо ячейки матрицы на эту ячейку подается токовый сигнал, позволяющий перемагнитить лишь внешний слой пленки (рис. 5 г). Плоскополяризованный свет, проходя через эту ячейку, будет претерпевать поворот плоскости поляризации во внешнем слое ячейки на угол φ . В зависимости от направления намагниченности внутреннего слоя данной ячейки плоскость поляризации света будет дополнительно поворачиваться на угол φ или $-\varphi$. В результате угол поворота плоскости поляризации света, прошедшего через выбранную ячейку матрицы, составит 2φ или 0 , в зависимости от информации (лог. "0" или "1"), записанной во внутреннем слое ячейки. Один из этих лучей гасится анализатором. Таким образом, регистрируя изменения интенсивности света, попадающего на фотоприемник при подаче токового сигнала выборки на определенную ячейку матрицы записи-выборки, считывают информацию, записанную во внутреннем слое данной ячейки.

Первое из описанных устройств адаптировано к считыванию сигналов звукового диапазона, а наличие системы световодов позволяет выделять узкую полосу сигналов. Второе устройство по сути является спектроанализатором сигналов в широком частотном диапазоне и обладает повышенным отношением сигнал/шум. Запоминающее устройство с произвольной выборкой информации является фактически магнитооптическим транспарантом и может быть использовано для обработки информации оптическими методами и в системах оперативной памяти ЭВМ.

3. Способы определения параметров магнитных пленок

Основными магнитными параметрами ЭПФГ являются: поле анизотропии, намагниченность насыщения, ориентация магнитных осей относительно поверхности пленок.

Поле одноосной анизотропии ЭПФГ измеряют следующим способом [8], (рис.6). Пленку 2 помещают между катушками 1 и воздействуют на нее криволинейным градиентным полем, ориентированным перпендикулярно ОЛН. ЭПФГ перемагничивается в тех областях, где магнитное поле было равно или превышало поле одноосной анизотропии. ДС, зародившаяся в этих областях, представляет собой смесь полосовых доменов и ЦМД разной полярности и отличается по конфигурации от неупорядоченной плотноупакованной системы ЦМД, получающихся при всех других значениях и ориентациях перемагничивающего поля. После окончания действия импульса наблюдаются три области конфигурационно отличающихся ДС. В тех областях пленки, где поле было равно или превышало поле одноосной анизотропии, появляются ДС, состоящие из неупорядоченных плотноупакованных ЦМД, причем линия, разделяющая ДС с ЦМД противоположной полярности, возникает в том объеме пленки, где касательная к магнитной силовой линии перпендикулярна нормали к пленке, что соответствует однородному зарождению ДС. В тех областях пленки, где магнитное поле было меньше поля одноосной анизотропии, пленка не перемагничивается и ДС представляет собой периодическую полосовую структуру (рис.7). Зная значение магнитного поля как функцию координат плоскости наблюдения, поле одноосной анизотропии определяют по координатам точки 1 (рис.7), разделяющей три различных по конфигурации типа ДС.

Измерения поля кубической анизотропии и наклона ОЛН производят с помощью устройства [9]. Пленка помещается в рабочий объем перемагничивающих катушек 1 (рис.6) и фиксируется на поворотном столике. По катушкам пропускается импульс тока, производится топографирование магнитного поля, фиксируется положение линии раздела разнополярных плотноупакованных ЦМД, затем пленку поворачивают на угол, задаваемый шагом изменения угла поворота пленки и повторяют цикл измерения положения границы раздела разных типов ДС при воздействии на образец криволинейным полем. По точкам измерения экстраполируется и строится зависимость отклонения линии однородного зарождения от линии смены знака, нормальной к плоскости пленки компоненты перемагничивающего поля в виде рядов Фурье, определяют угол наклона ОЛН относительно нормали образца по формуле $\text{ctg } \theta_0 = 2C/\Delta g$, где C - константа прибора, Δg - амплитуда первой гармоники. Константу кубической анизотропии K_1 определяют по формуле

$$K_1 = K_d/M_0^2 (2 \cdot 2^{1/2} C/3\Delta g + 1).$$

Проекция кристаллографических направлений на поверхности без применения сложных физических измерений можно определять достаточно простым магнитооптическим методом [10], заменив в устройстве [9] систему катушек на конический концентратор.

Ориентацию ОЛН определяют с помощью устройства (рис.8) [11]. Образец 1 закрепляют на лимбе 2, позволяющем вращать образец в собственной плоскости, и помещают его в магнитную систему 3, состоящую из двух взаимно перпендикулярных пар катушек Гельмгольца, одна из

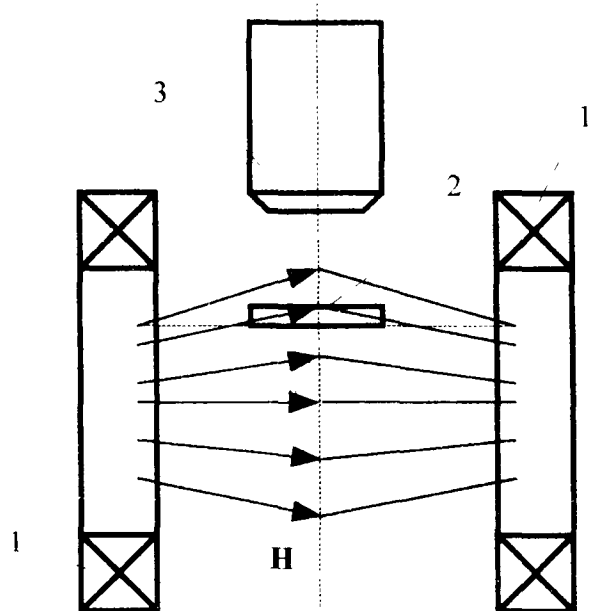


Рис. 6. Схема устройства для измерения параметров ЭПФГ

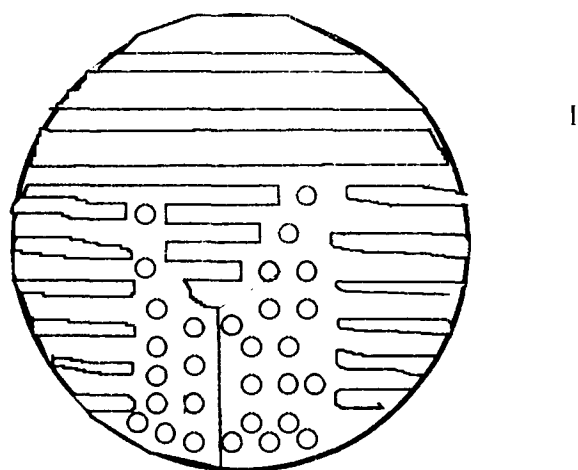


Рис. 7. Доменная структура одноосной ЭПФГ

которых создает поле, перпендикулярное плоскости образца, а другая — параллельное. Две пары катушек питаются от источника 4 двумя синусоидальными токами, сдвинутыми на 90° друг относительно друга, и создают магнитное поле, вращающееся в плоскости, перпендикулярной плоскости образца. Перпендикулярно плоскости образца направляют луч лазера 5, проходящий через поляризатор 6. Проходя через образец, луч лазера попадает на анализатор 7, который находится в скрещенном с поляризатором положении, и далее — на фотоприемник 8. Затем измеряют сдвиг фазы между сигналом с фотоприемника и сигналом с резистора 9, пропорциональным току катушек, создающих поле, параллельное плоскости образца, с помощью двухлучевого осциллографа 10. На вход внешней синхронизации осциллографа подается сигнал с формирователя прямоугольных импульсов 11, на который поступает сигнал с резистора 9. Вращая лимб с образцом, отыскивают положение, когда сдвиг фазы максимален. На рис.9 схематически изображены доменная структура и различные фазы вращения поля H_0 . ОЛН лежит в плоскости, которая совпадает с плоскостью вращения поля H_0 , направление ОЛН составляет угол θ_0 с нормалью к пленке. Стрелками на рисунке показаны направления векторов намагниченности в пределах каждого домена, совпадающие с направлением ОЛН. При отсутствии внешнего поля фарадеевское вращение равно нулю, так как образец размагничен, интенсивность проходящего света минимальна. При приложении внешнего поля ориентации β^+ энергетически выгодными становятся домены с вектором намагниченности, направленным вверх, а при ориентации поля β^- — вниз. Знаки фарадеевского вращения для света, перпендикулярного поверхности пленки для этих двух направлений, противоположны. При ориентации поля вдоль β , где $\beta = \theta_0 + 90^\circ$, фарадеевское вращение меняет знак, так как в этом положении меняет знак проекция магнитного поля на направление ОЛН. Поэтому, это направление внешнего поля соответствует размагниченному состоянию пленки, нулевому фарадеевскому вращению и, следовательно, минимальной интенсивности светового сигнала.

В заключение отметим, что использование ЭПФГ в прикладных целях позволяет создать класс новых методов и устройств, которые находят применения как в физических исследованиях, так и в микроэлектронике и вычислительной технике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эшенфельдер А. Физика и техника цилиндрических магнитных доменов.— М.: Мир, 1983.— 496 с.
2. А.с. 1455332 СССР, МКИ G 02 F 1/09. Датчик магнитного поля / Вилесов Ю.Ф., Дубинко С.В., Карпенко Н.И. и др.— Оpubл. 30.01.89, Бюл. № 4.
3. А.с. 1348760 СССР, МКИ G 01 R 33/00. Устройство для измерения напряженности магнитного поля / Дубинко С.В., Крамарь А.Д., Groшенко Н.А., Пухов И.К.— Оpubл. 31.10.87, Бюл. № 40.

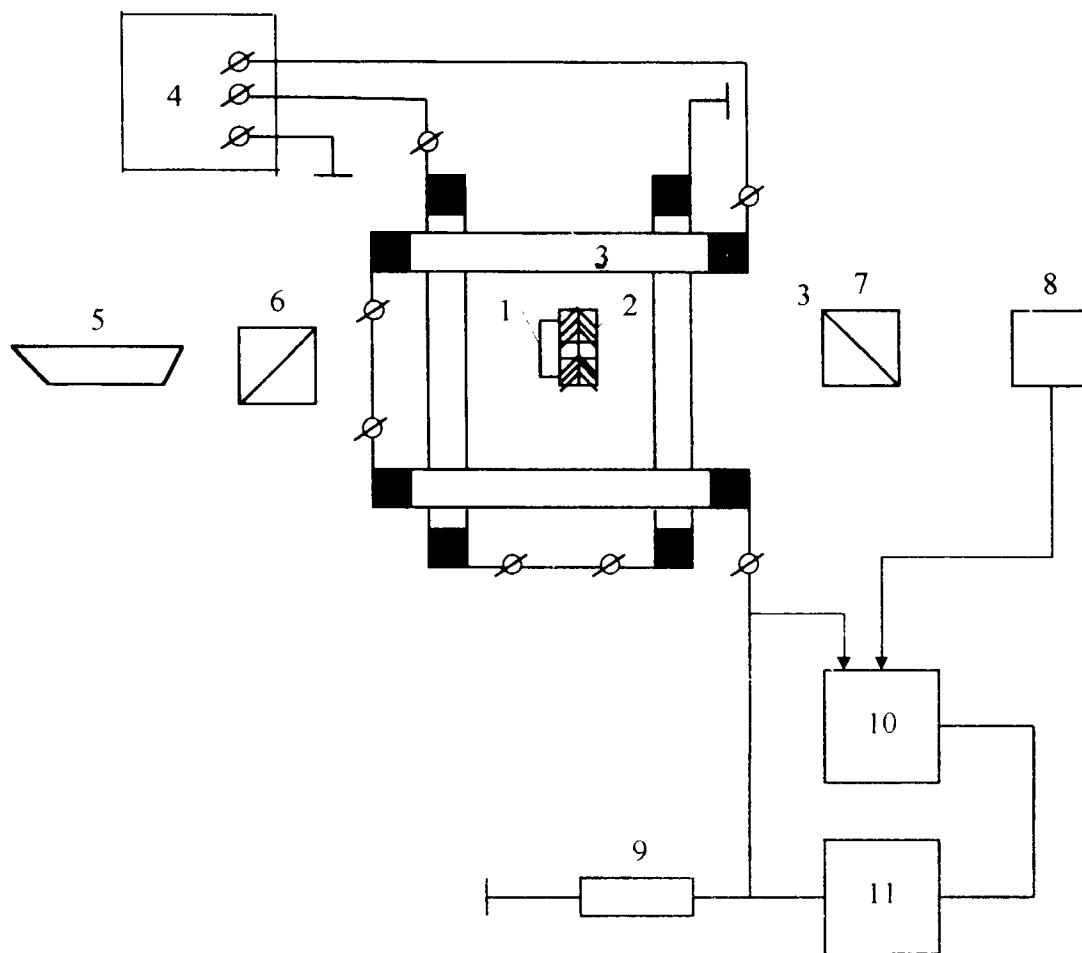


Рис. 8. Схема устройства для определения ориентации ОЛН

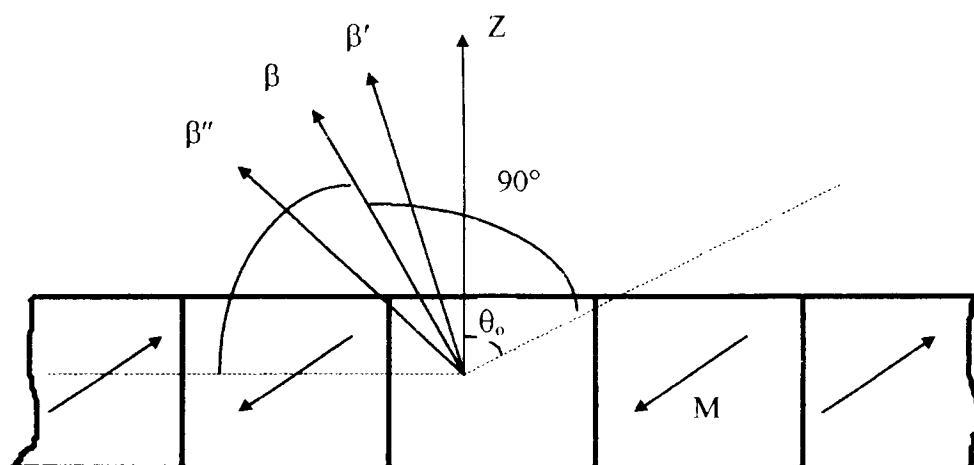


Рис. 9. ДС и фазы вращения H_ω

4. А.с. 1078369 СССР, МКИ G 01 R 33/05. Устройство для измерения радиуса кривизны магнитного поля / Дубинко С.В., Иванов В.И., Пухов И.К.— Оpubл. 07.03.84, Бюл. № 9.
5. А.с. 1522281 СССР, МКИ G 11 B 11/18. Устройство для оптического воспроизведения информации с носителя магнитной записи / Дубинко С.В., Карпенко Н.И., Панченко В.Б.— Оpubл. 15.11.89, Бюл. № 42.
6. А.с. 1732289 СССР, МКИ G 01 R 23/17. Магнитооптическая считывающая головка / Вилесов Ю.Ф., Дубинко С.В., Дубинин А.В., Ярыгин А.В.— Оpubл. 07.05.92, Бюл. № 17.
7. А.с. 1287233 СССР, МКИ G 11 C 13/06. Запоминающее устройство с произвольной выборкой / Дубинко С.В., Карпенко Н.И., Чельдиев М.И., Болдырев А.С.— Оpubл. 30.01.87, Бюл. № 4.
8. А.с. 1245096 СССР, МКИ G 01 R 33/12. Способ определения поля одноосной анизотропии пленок с цилиндрическими магнитными доменами / Дубинко С.В., Иванов В.А., Пухов И.К.
9. А.с. 1382194 СССР, МКИ G 01 R 33/05. Способ измерения поля анизотропии пленок с цилиндрическими магнитными доменами / Дубинко С.В., Иванов В.А.
10. А.с.1393102 СССР, МКИ G 01 R 33/12. Способ определения проекций кристаллографических направлений в пленках с цилиндрическими доменами / Дубинко С.В., Иванов В.А., Мицай Ю.Н.
11. А.с.1517558 СССР, МКИ G 01 R 33/04. Способ определения ориентации оси легкого намагничивания прозрачных пленок / Бурым Ю.А., Дубинко С.В.