

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА**

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ЗАДАЧА

**ДИНАМИКА БЛОХОВСКОЙ ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЫ.
ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ.**

СПЕЦПРАКТИКУМ КАФЕДРЫ МАГНЕТИЗМА

МОСКВА 2021

Составители: Стрелков Н.В.
Анрианов Т.А.
Шапаева Т.Б.

Цель настоящей работы познакомиться с особенностями динамики блоховской доменной границы. Для достижения этой цели будут решены следующие задачи:

- используя уравнение Ландау-Лифшица, будет получена теоретическая зависимость скорости движения блоховской доменной границы от величины внешнего магнитного поля и проведено сравнение структуры статической и динамической доменной границы;
- по фотографиям динамической доменной границы, полученных с помощью методов однократной и двукратной высокоскоростной фотографии, будут построены зависимость смещения доменной границы от времени и зависимость скорости движения границы от величины внешнего магнитного поля;
- экспериментально полученное значение подвижности доменной границы будет сопоставлено с расчетным значением.

Теория динамики доменной границы

Фундаментальным исходным уравнением при теоретическом анализе динамики доменной границы является предложенное Ландау и Лифшицем уравнение движения магнитного момента \vec{M} . Для краткости сразу запишем его с релаксационным членом в форме Гильберта применительно к системе, изображённой на Рис. 1:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \gamma \left[\vec{H}_{\text{эфф}} \times \vec{M} \right] + \frac{\alpha}{M_0} \left[\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} \right], \quad \vec{H}_{\text{эфф}} = - \frac{\delta F}{\delta \vec{M}}, \quad (1)$$

$$F = A \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \sin^2 \theta \right] + K \sin^2 \theta + 2\pi M_0 \sin^2 \theta \sin^2 \varphi - M_0 H \cos \theta,$$

где γ – гиромагнитное отношения для электрона, α – параметр затухания, F – свободная энергия, состоящая из слагаемых: обменной энергии, энергии анизотропии, энергии размагничивающего поля и Зеемановской энергии соответственно, A – константа обменного взаимодействия, K – константа анизотропии.

В 1935 г. в работе Ландау и Лифшица была впервые разработана теория движения одномерной блоховской доменной границы в пределе малых скоростей и получено линейное соотношение между скоростью границы и полем, которое ориентировано вдоль оси лёгкого намагничивания. Дальнейшее развитие теория получила в работе Уокера, который нашёл точное решение для случая образца с одноосной магнитной анизотропией.

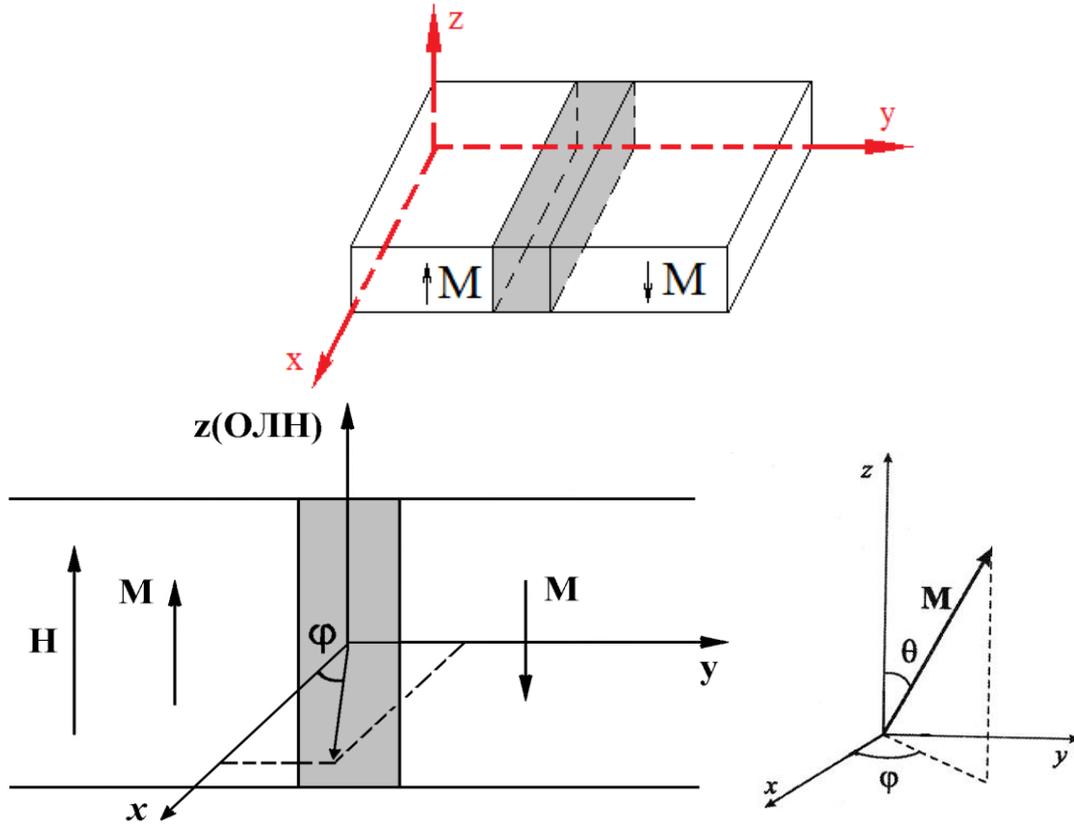


Рис. 1: Бесконечная блоховская доменная граница во внешнем магнитном поле H : M – намагниченность в соседних доменах; θ , φ – угловые координаты.

В сферических координатах (угловых координатах θ и φ) уравнение Ландау-Лифшица в форме Гильберта (1) может быть сведено к системе из двух уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\theta} + \alpha \dot{\varphi} \sin \theta = \omega_m \sin \theta \sin \varphi \cos \varphi + \frac{\omega_m Q \delta_o^2}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial y} \left(\sin^2 \theta \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right), \\ -\alpha \dot{\theta} + \dot{\varphi} \sin \theta = \omega_m \sin \theta \cos \theta \sin^2 \varphi + \omega_m Q \sin \theta \cos \theta + \\ \gamma H \sin \theta + \omega_m Q \delta_o^2 \left[\sin \theta \cos \theta \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 - \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \right], \end{cases} \quad (2)$$

где $\omega_m = 4\pi\gamma M_0$ и $\delta_o = \sqrt{A/K}$. Решение (1) ищем в виде:

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi(t), \quad \theta = \theta(\xi(t)), \\ \xi(t) &= \frac{y(t) - q(t)}{\delta(\varphi)}, \quad \delta(\varphi) = \frac{\delta_o}{\sqrt{1 + \sin^2 \varphi / Q}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $q(t)$ – смещение доменной границы под действием поля, $Q = K/(2\pi M_0^2)$ – фактор качества материала.

Поскольку производные по времени от углов θ и φ связаны между собой (2), структура динамической доменной границы отличается от структуры статической, в частности, тем, что в процессе движения границы магнитные моменты отклоняются относительно плоскости стенки на угол $\varphi = const$, т.е. ориентация намагниченности внутри ДГ зависит не только от одной координаты. Исходя из этих соображений, в 1963 г. Уокером было получено стационарное решение (1) ($y = Vt$, $\varphi(t) = 0$):

$$V(H) = \frac{\mu H}{\sqrt{1 + \sin^2 \varphi / Q}}, \quad \mu = \frac{\gamma \delta_0}{\alpha}, \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \arcsin \frac{H}{H_W}, \quad H_W = 2\pi\alpha M_0,$$

где μ – подвижность доменной границы, H_W – критическое поле Уокера.

Зависимость скорости движения ДГ от величины внешнего поля можно переписать в явном виде, используя полученные выражения (4):

$$V(H) = \frac{V_W H \sqrt{1 + \frac{1}{2Q}}}{H_W \sqrt{1 + \frac{1}{2Q} (1 - \sqrt{1 - (H/H_W)^2})}}. \quad (5)$$

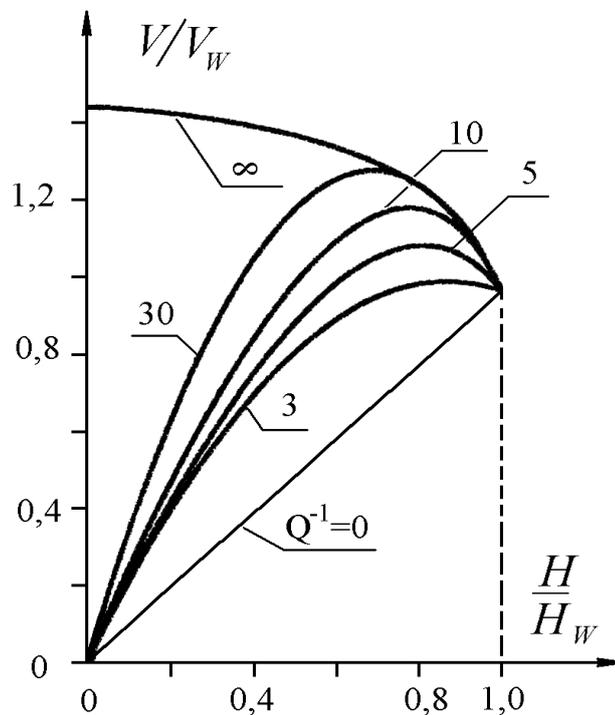


Рис. 2: Зависимость относительной скорости стационарного движения доменной границы от приведенной величины внешнего магнитного поля при различных значениях фактора качества Q .

Решение (4) существует только при условии $H \leq H_W$. В полях, превышающих поле Уокера стационарного движения не существует.

На рис. 2 представлены рассчитанные по формуле (5) для разных Q зависимости $V(H)$; их нелинейный характер при $Q^{-1} > 1$ объясняется динамическим уменьшением ширины стенки по мере возрастания H . Если $Q \rightarrow \infty$ ($Q^{-1} \rightarrow 0$), то вплоть до $H = H_W$ скорость доменной границы будет линейно зависеть от продвигающего поля H :

$$V(H) = \mu H, \quad \mu = \frac{\gamma \delta_o}{\alpha}. \quad (6)$$

Скорость доменной границы в поле Уокера называется критической скоростью Уокера:

$$V_W = 2\pi\gamma\delta_o / \sqrt{1 + \frac{1}{2Q}}. \quad (7)$$

Когда $Q \gg 1$, то задача о динамике блоховской доменной границы значительно упрощается. Структура границы определяется тогда, в первую очередь, обменным взаимодействием и анизотропией (как и в случае статической блоховской доменной границы), а силы магнитостатического происхождения и силы, связанные с действием внешнего поля и с динамической реакцией, являются поправками. В результате ширина границы не меняется при движении, а, следовательно, не меняется и её подвижность.

Толщина динамической доменной границы определяется выражением:

$$\delta(\varphi) = \frac{\delta_o}{\sqrt{1 + \sin^2 \varphi / Q}} = \frac{\delta_o}{\sqrt{1 + \frac{1}{2Q} (1 - \sqrt{1 - (H/H_W)^2})}}. \quad (8)$$

Наименьшая толщина доменной границы наблюдается при её движении в поле Уокера $H = H_W$:

$$\delta_{\min}(\varphi) = \delta_o / \sqrt{1 + \frac{1}{2Q}}. \quad (9)$$

Помимо критической скорости стационарного движения доменная граница может обладать и максимальной (предельной) скоростью стационарного движения V_m :

$$V_m = 2\gamma\sqrt{2\pi A} \quad (Q \ll 1). \quad (10)$$

В полях, превышающих поле Уокера ($H > H_W$), доменная граница движется вдоль оси y , совершая колебательные движения (Рис. 3). При этом структура доменной границы периодически меняется от блоховской к неелевской и обратно.

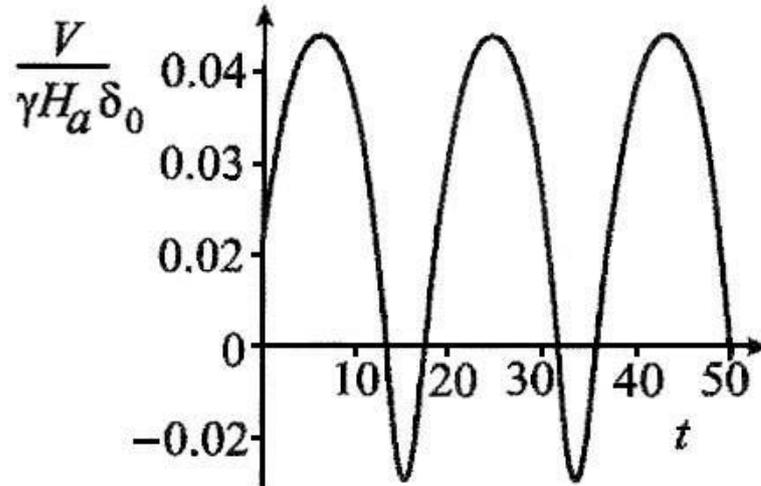


Рис. 3: Зависимость скорости движения доменной границы от времени. Результаты расчетов для $\alpha=0.1$ и $Q=10$, $H/H_W=2$.

Выражение для скорости доменной границы в этом случае можно записать в виде:

$$V = 2\pi\gamma M_0 \delta_0 \frac{\alpha^2}{1 + \alpha^2} \left(\frac{H}{H_W} + \frac{H_W}{\alpha^2 \left(H + \sqrt{H^2 - H_W^2} \right)} \right). \quad (11)$$

Впервые эта зависимость была получена Слончевским в 1972 г. Независимо, другими методами эту зависимость получили Хуберт (1977), а также Раев и Ходенков (1981).

На рисунке 4а представлены кривые $V(H)$, рассчитанные по формуле (10) для разных значений параметра α . На всех зависимостях после начального линейного участка есть область с отрицательной подвижностью. При $\alpha = 0,2$ в больших полях наблюдается рост скорости, при этом скорость ДГ не превышает скорость Уокера. На рисунке 4б показана экспериментальная зависимость $V(H)$, полученная методом двукратной высокоскоростной фотографии. Эта зависимость соответствует кривым, представленным на рис.4а.

Можно записать подвижность доменной границы в области сильных полей ($\tilde{\mu}$) и найти связь между подвижностью в сильных и слабых полях:

$$\tilde{\mu} = \frac{\alpha \delta_o \gamma}{1 + \alpha^2} \quad (H \gg H_W), \quad \tilde{\mu} = \alpha^2 \mu. \quad (12)$$

Поскольку под действием магнитного поля, превышающего поле Уокера, внутренняя структура доменной границы периодически меняется, энергия внешнего магнитного поля, управляющего движением границы, расходуется не только на ее продвижение, но и на стабилизацию ее структуры. Именно этим объясняется наличие участка с отрицательной дифференциальной подвижностью на зависимости $V(H)$. Из выражения для скорости доменной границы (5) можно увидеть, что максимальная скорость достигается при $H \leq H_W$, а при $H > H_W$ существует область с отрицательной дифференциальной подвижностью, где скорость с ростом поля уменьшается (Рис. 4 а,б).

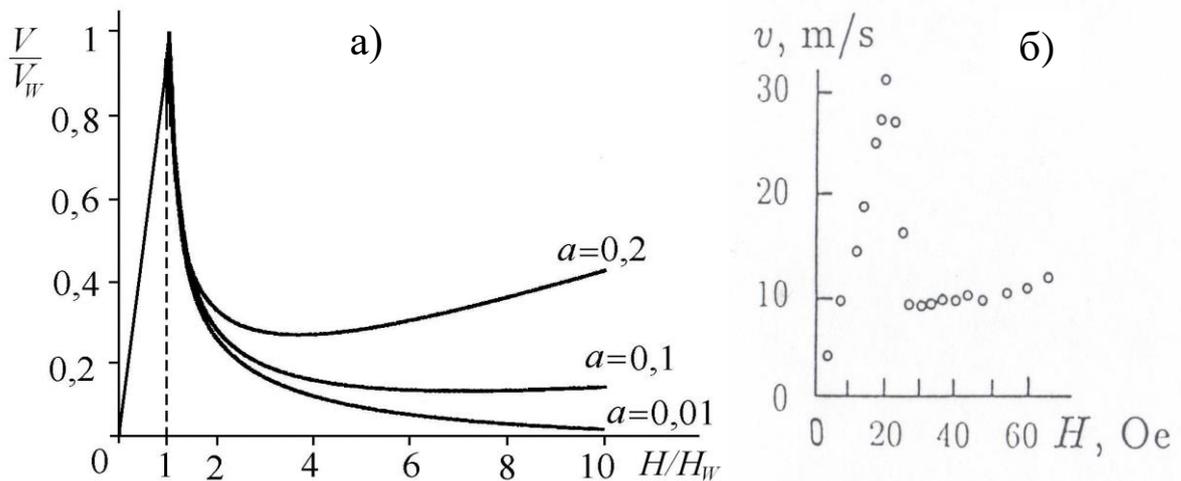


Рис. 4: (а) Зависимость скорости движения ДГ от внешнего магнитного поля для различных значений параметра затухания ($Q \rightarrow \infty$) [1], (б) Экспериментальная зависимость скорости движения доменной границы в пленках феррита-граната от величины магнитного поля [2].

Изучение динамики доменной границы в пленке феррита-граната под действием импульсного магнитного поля

Упражнение 1. Метод однократной фотографии

Для исследования динамики доменных границ (ДГ) могут быть использованы разные методы: метод Сикстуса-Тонкса и его магнитооптический аналог, метод коллапса цилиндрических магнитных доменов, методы однократной и двукратной высокоскоростной фотографии [2], метод, основанный на эффекте Холла [3], а также метод, в котором используется дифракция света на доменной структуре [4]. Увидеть динамическую доменную границу позволяют только методы высокоскоростной фотографии.

В настоящем разделе для определения скорости движения ДГ будет использован метод однократной высокоскоростной фотографии. Схема установки показана на Рис. 5.

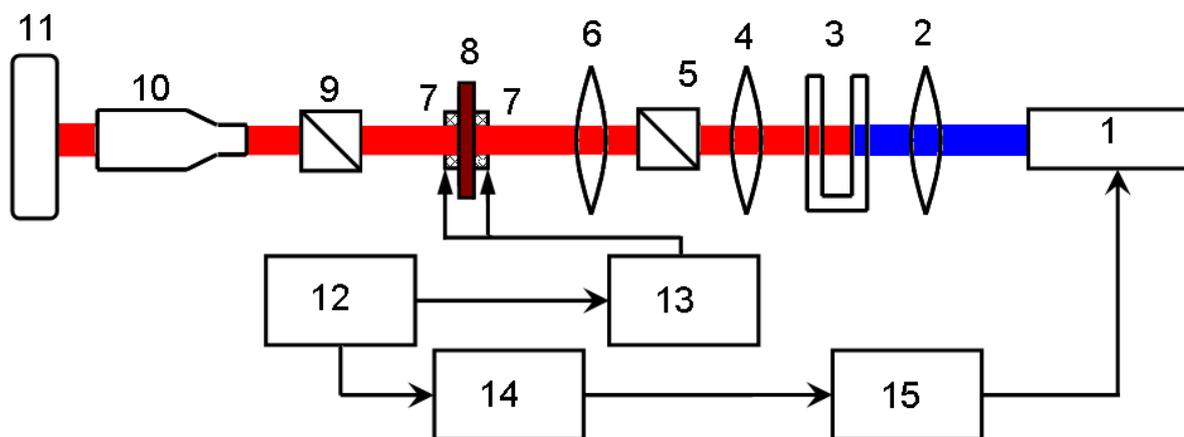


Рис. 5: Схема экспериментальной установки для исследования динамики доменных границ методом однократной высокоскоростной фотографии 1 – импульсный лазер, 2, 4, 6 – линзы, 3 – кювета с красителем, 5 – поляризатор, 7 – катушки, создающие продвигающее магнитное поле, 8 – образец, 9 – анализатор, 10 – микроскоп, 11 – фотокамера, 12 – запускающий генератор, 13 – генератор импульсов тока, 14 – генератор, 15 – блок питания лазера.

Работа лазера (1) синхронизирована с работой генератора (13), с помощью которого создается импульсное магнитное поле в катушках (7), расположенных на образце (8). Работа системы в целом синхронизирована так, что камера (11) фиксирует состояние системы в определенный момент времени. Изменяя задержку между импульсом света и импульсом тока, можно



Рис. 6: Лабиринтная доменная структура в пленке феррита-граната. Намагниченность в соседних доменах ориентирована перпендикулярно поверхности пленки.

получить серию фотографий динамической доменной границы. После обработки этих фотографий можно получить зависимость смещения ДГ от времени и вычислить значение максимальной скорости.

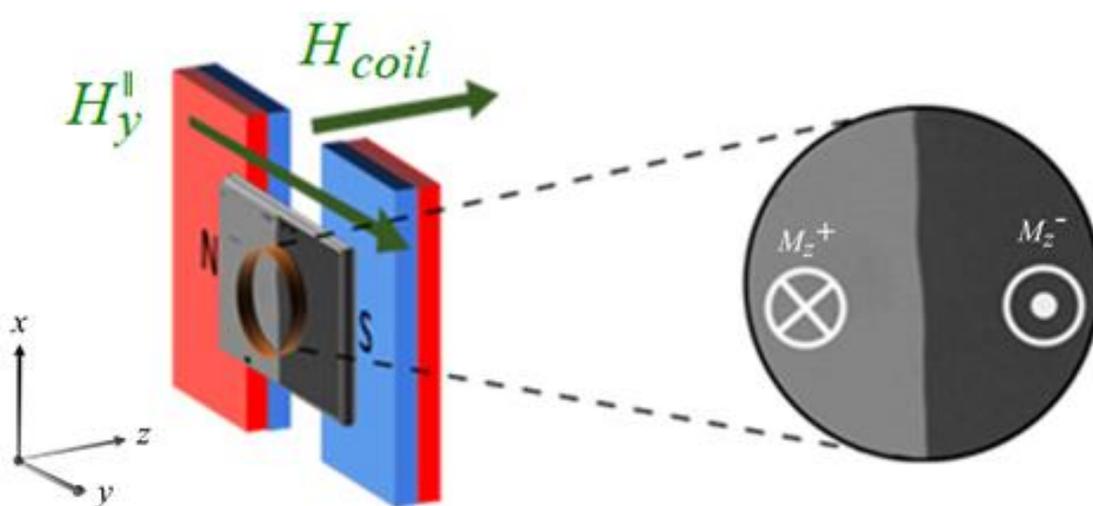


Рис. 7: Использование градиентного магнитного поля для создания в пленке феррита-граната единственной доменной границы. M_z^\pm – намагниченность в доменах, направленная перпендикулярно плоскости образца от наблюдателя и на него. H_y^\parallel – плоскостная компонента магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами. Соленоид на поверхности образца, создает импульсное магнитное поле H_{coil} , запускающее движение доменной границы.

Длительность импульса света в эксперименте может составлять от десятков фемтосекунд до сотен пикосекунд. В настоящем эксперименте длительность световых импульсов была 150 фс.

Известно, что в пленке феррита-граната в отсутствие внешнего магнитного поля реализуется лабиринтная доменная структура (Рис. 6), намагиченность в соседних доменах ориентирована перпендикулярно поверхности пленки. Для создания в образце единственной ДГ и гарантии повторяемости экспериментов, положение единственной доменной границы в образце стабилизируют с помощью градиентного магнитного поля (Рис. 7). Для создания этого поля в эксперименте обычно используют постоянные магниты. В настоящем эксперименте величина этого поля была 3,3 кЭ/см, ее не меняли в процессе измерений. Наряду с перпендикулярной компонентой H_z градиентное магнитное поле имеет и плоскостную компоненту, ориентированную в плоскости образца перпендикулярно плоскости ДГ H_y^{\parallel} .

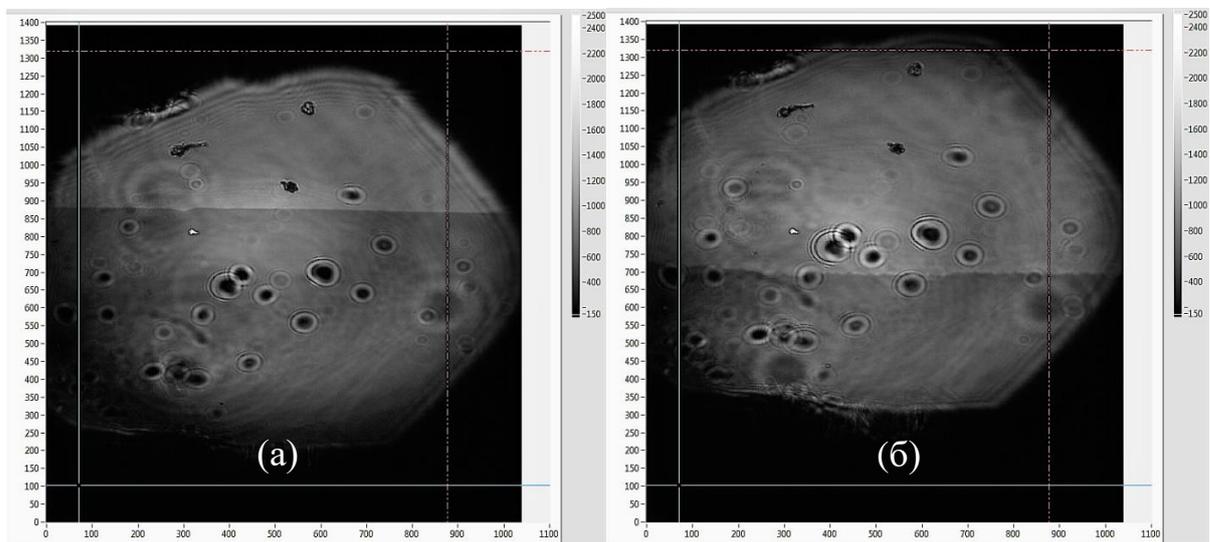


Рис. 8: Однократные фотографии динамической доменной границы в момент времени $t_1=0$ (а) и $t_2=1$ мкс (б) с начала действия импульса поля с амплитудой 200 Э. Размер кадра по вертикали (1400 делений) 1,28 мм.

На Рис. 8 представлены однократные фотографии динамической доменной границы в моменты времени $t_1=0$ (а) и $t_2=1$ мкс (б) с начала действия импульса поля с амплитудой 200 Э. Размер кадра по вертикали (1400 делений) – 1,28 мм. Выбрав неподвижные дефекты на поверхности образца, можно определить координату ДГ (y) в разные моменты времени (t) и, обработав серию фотографий, получить зависимость $y(t)$. По начальному линейному участку этой зависимости можно определить скорость движения границы.

В этом упражнении, необходимо:

- определить величину плоскостной компоненты постоянного магнитного поля, создаваемого градиентными магнитами H_y^{\parallel} ;

- получить зависимость смещения ДГ под действием прямоугольного импульса магнитного поля от времени $y(t)$;
- используя эту зависимость, определить скорость движения доменной границы V ;
- провести моделирование динамики ДГ при ее движении из положения равновесия.

Экспериментальная часть

1.1 Определение плоскостной компоненты градиентного магнитного поля

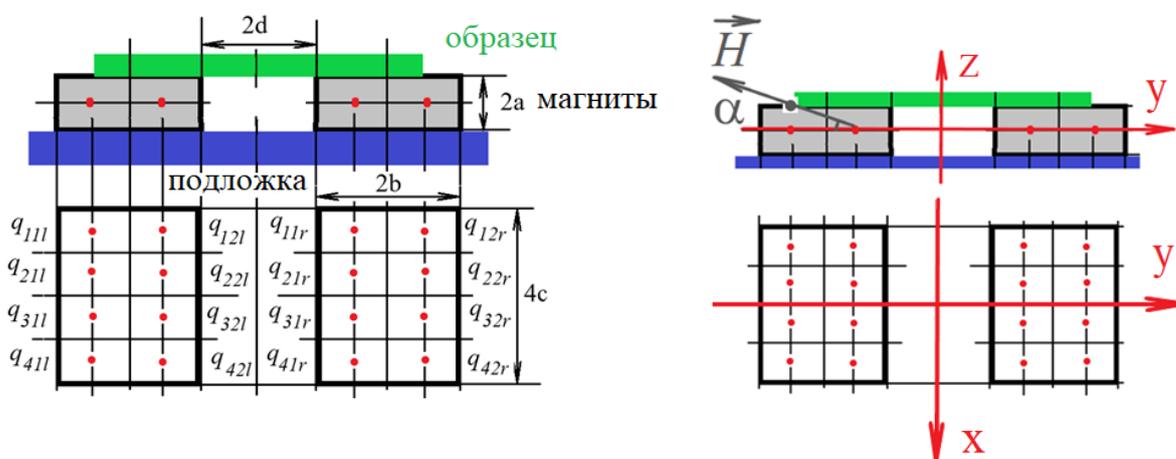


Рис. 9: Геометрия системы: $2a=2$ мм; $a=1$ мм; $2b=6$ мм; $b=3$ мм; $4c=12$ мм; $c=3$ мм; $2d=3$ мм; $d=1,5$ мм.

На Рис. 9 показана геометрия системы, состоящей из немагнитной подложки (выделена синим), образца (выделен зеленым) и постоянных магнитов, создающих градиентное магнитное поле, (серые). Зная зависимость компоненты градиентного магнитного поля H_z на нижней поверхности образца в точке с координатами $(0,0,a)$ от координаты y $H_z(0,y,a) = G \cdot y$, где G – величина градиентного магнитного поля ($G=3,3$ кЭ/см), можно определить компоненту этого поля в точке $H_y(0,0,a)$, предполагая, что его создают равные по модулю магнитные заряды ($q_{11l} = q_{12l} = \dots = q_{42r}$), расположенные в точках, выделенных на Рис. 9 красным цветом.

1.2 Получение зависимости координаты доменной границы от времени и вычисление скорости движения границы

Для получения зависимости смещения доменной границы из положения равновесия от времени необходимо по каждому изображению из папки «однократные фотографии» (ссылка на фотографии дана в конце описания) провести не менее трех измерений. На фотографии следует выбрать несколько

дефектов, положение которых не меняется. Пример такого выбора показан на Рис. 10. Измеряя расстояния между выбранными точками и доменной границей, можно получить зависимость расстояния, пройденного доменной границей, от времени. Для удобства следует считать, что в начальный момент времени доменная граница находится в точке с координатой $y = 0$.

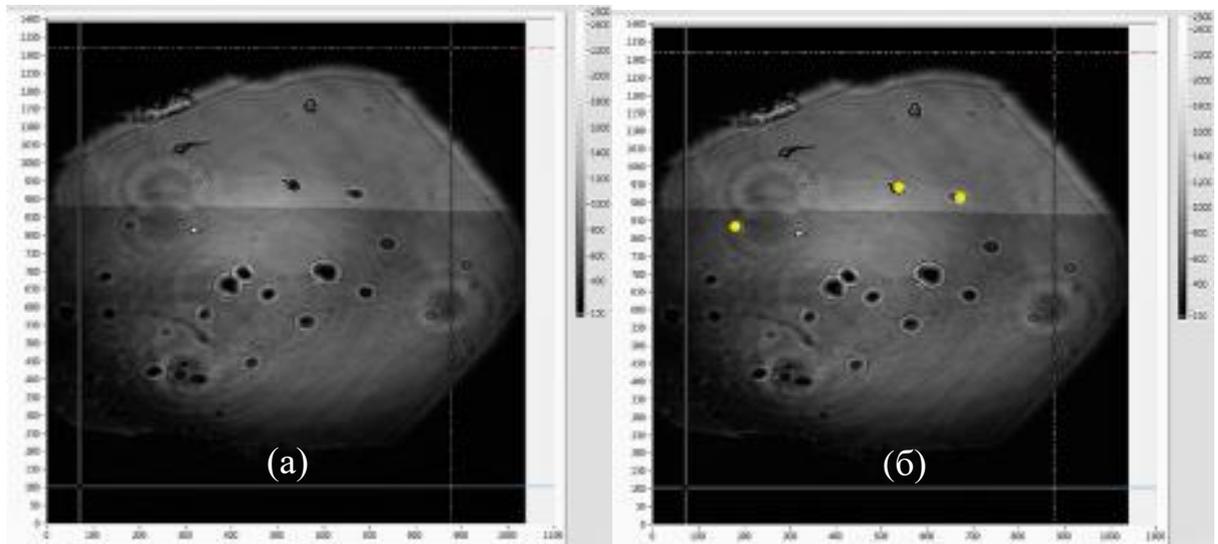


Рис. 10: Пример выбора неподвижных точек для измерений смещения доменной границы из положения равновесия: (а) – исходная фотография (б) – та же фотография с выделенными желтым цветом неподвижными дефектами, относительно которых будет измерена координата доменной границы.

В названии фотографий содержится информация о том, в какой момент времени с начала действия импульса магнитного поля они сделаны. Например, фотография «Garnet_mobility_200Oe_0.4us» была получена через 0,4 мкс после начала действия импульса магнитного поля с амплитудой 200 Э. В этой серии фотографий амплитуда импульса магнитного поля была постоянна.

По начальному участку зависимости $y(t)$ можно определить величину скорости движения доменной границы, соответствующую амплитуде импульса магнитного поля.

1.3 Моделирование динамики доменной границы под действием импульсного и градиентного магнитного полей

Ранее уже было отмечено, что градиентное магнитное поле стабилизирует начальное положение доменной границы. На Рис. 11а схематично показана зависимость компоненты градиентного магнитного поля H_z от координаты y в геометрии, представленной на Рис. 9. Импульсное магнитное поле, создаваемое в катушках, которые расположены на поверхностях образца, приводит к смещению границы из положения равновесия. В той области

образца, где происходит движение ДГ, магнитное поле, создаваемое катушками, можно считать не зависящим от координат x и y . Таким образом, суммарное поле, действующее на доменную границу в начальный момент времени, зависит от координаты y так, как показано на Рис. 11б и может быть описано соотношением: $H_z(y) = G \cdot y - H_{coil}$, где $G=3,3$ кЭ/см – градиентное магнитное поле. Максимальное смещение доменной границы из положения равновесия определяется величинами градиентного и импульсного магнитных полей. В точке y_{max} , где $H_z(y_{max}) = 0$, доменная граница остановится. $y_{max} = H_{coil}/G$.

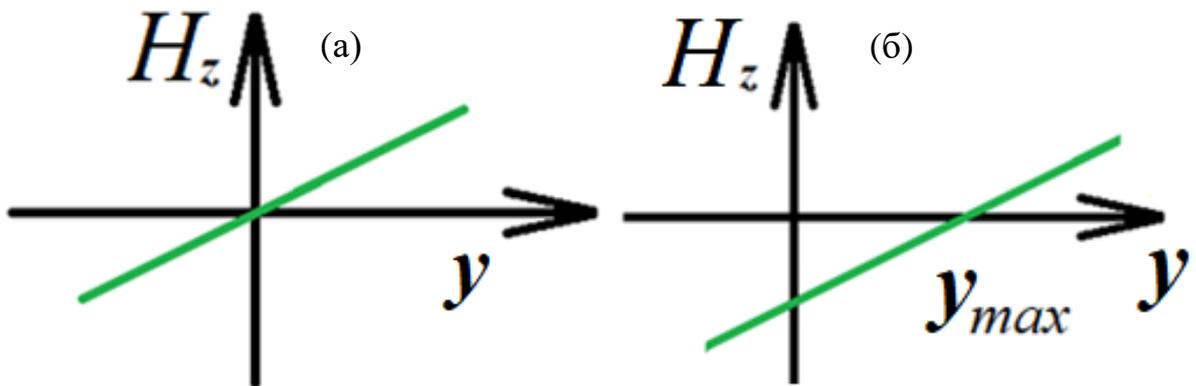


Рис. 11: Зависимость компоненты градиентного магнитного поля, перпендикулярной плоскости образца, от координаты y : в отсутствие и в присутствии импульсного магнитного поля (а) и (б) соответственно.

Уравнение движения доменной границы имеет вид: $m\dot{V} = F$, где F – сила, действующая на доменную границу, m – ее масса. Поскольку сила, продвигающая доменную границу, пропорциональна внешнему магнитному полю, уравнение движения границы можно записать в виде:

$$m\dot{V} = C(G \cdot y - H_{coil}), \quad (13)$$

где C – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность [Н/Э]. Левую часть уравнения можно преобразовать, используя соотношения:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dy} \cdot \frac{dy}{dt} = V \frac{dV}{dy}. \quad (14)$$

Тогда уравнение движения ДГ будет иметь вид:

$$mV \frac{dV}{dy} = C(G \cdot y - H_{coil}). \quad (15)$$

Для получения теоретической зависимости смещения ДГ из положения равновесия от времени необходимо решить задачу Коши с условиями:

$$\begin{cases} mV \frac{dV}{dy} = C(G \cdot y - H_{coil}) \\ y(t = 0) = 0 \\ V(y_{max} = \frac{H_{coil}}{G}) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

Результаты расчетов представьте в виде зависимости $V(y)$ и $y(t)$. Последнюю зависимость можно преобразовать к виду $y(t)/y_{max}$ и сравнить с аналогичной экспериментальной кривой, полученной в п.1.2.

Упражнение 2. Метод двукратной фотографии. Определение подвижности ДГ

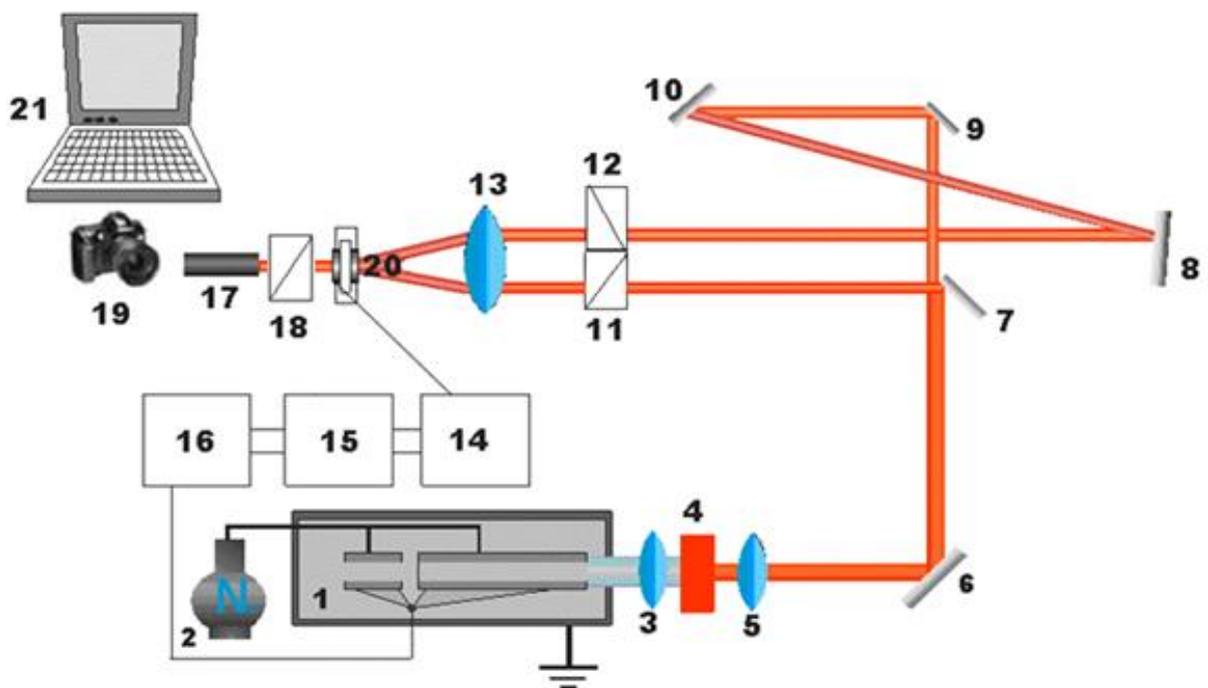


Рис. 12: Схема экспериментальной установки для исследования динамики доменных границ методом двукратной высокоскоростной фотографии. 1 – лазер; 2 – сосуд Дьюара с азотом; 3, 5, 13 – линзы; 4 – кювета с красителем; 6 – 10 – зеркала; 11, 12 – поляризаторы; 14 – генератор, подающий импульсы тока в катушки, 15 – запускающий генератор, 16 – блок питания лазера, 17 – микроскоп, 18 – анализатор; 19 – фотокамера; 20 – образец; 21 – компьютер.

Метод двукратной фотографии, основанный на эффекте Фарадея – уникальный метод исследования динамики доменных границ в прозрачных ферромагнетиках [2]. В отличие от метода однократной фотографии, для определения величины скорости движения ДГ достаточно одной фотографии

динамической доменной границы, что значительно повышает эффективность работы.

Схема установки для реализации этого метода показана на Рис. 12. Свет от импульсного лазера (1) с помощью зеркала (7) разделяют на два луча одинаковой интенсивности. Динамическую доменную границу в образце (20) освещают двумя световыми импульсами. Один из них с помощью системы зеркал (8-10) задержан относительно другого. Разность хода между лучами 30 см создает задержку между световыми импульсами 1 нс. Обычно в эксперименте задержка между двумя световыми импульсами может составлять от нескольких наносекунд до нескольких десятков наносекунд. Ее величину устанавливают в зависимости от характерных скоростей движения ДГ в материале: чем больше скорость движения, тем меньше задержка между световыми импульсами. Длительность одного импульса света может составлять от десятков фемтосекунд до сотен пикосекунд. В настоящем эксперименте длительность световых импульсов составляла 250 пс, задержка между двумя импульсами (630 нм) составляла 13 нс.

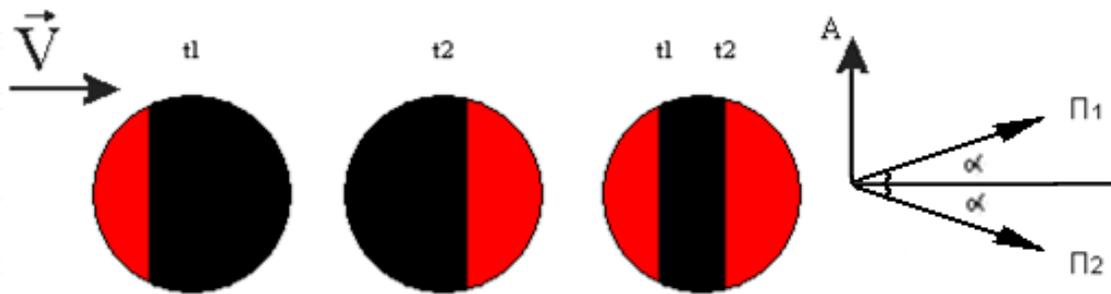


Рис. 13: Схема получения контраста двукратных фотографий «в контрасте доменов». Доменная граница движется слева направо. Первый луч фиксирует положение динамической доменной границы в момент времени t_1 , второй луч – в момент времени t_2 . Темная полоса на двукратной фотографии – расстояние, пройденное доменной границей за интервал времени между световыми импульсами. В правой части рисунка показано взаимное расположение главных осей поляризаторов Π_1 и Π_2 и анализатора A . На Рис. 12 поляризаторы Π_1 и Π_2 – обозначены (11) и (12), а анализатор – (18).

Первый и второй луч проходят через поляризаторы (11) и (12) соответственно и анализатор (18). Главные оси поляризаторов и анализатора устанавливают так, чтобы изображения доменной структуры, полученные с помощью первого и второго луча, были обратны (Рис. 13). При наложении изображений доменной структуры, полученных в моменты времени t_1 и t_2 , на фотографии получается темная полоса, ширина которой S – расстояние, пройденное доменной границей за интервал времени между двумя световыми

импульсами. Зная задержку между световыми импульсами t_1 и t_2 , можно определить скорость движения доменной границы:

$$V = \frac{S}{t_2 - t_1}. \quad (17)$$

Положение единственной доменной границы в этом эксперименте фиксируют с помощью градиентного магнитного поля 6 кЭ/см. Доменная граница движется под действием импульсного магнитного поля, создаваемого с помощью соосных катушек с внутренним диаметром 1-2 мм, которые расположены на поверхностях образца. Управляя временем задержки между световыми импульсами и импульсом продвигающего магнитного поля, можно получить изображения динамической доменной границы в разные моменты времени.

Работа оптической системы синхронизирована с работой генератора, создающего импульсное магнитное поле в катушках. Это является гарантией того, что на одной двукратной фотографии будут последовательно зафиксированы два положения доменной границы, движение которой вызвано одним импульсом магнитного поля.

В настоящем упражнении необходимо:

- определить скорость движения доменной границы по фотографиям, полученным для разных величин импульсных магнитных полей и построить зависимость скорости движения доменной границы от величины внешнего магнитного поля $V(H_{coil})$;
- вычислить значение подвижности доменной границы μ_3 ;
- используя значения параметров пленок ферритов-гранатов из работы [5], вычислить максимальное и минимальное значение подвижности и сравнить с ранее полученным результатом.

2.1 Определение зависимости скорости движения доменной границы от величины импульсного магнитного поля и вычисление подвижности

Для получения зависимости скорости движения доменной границы от величины импульсного магнитного поля по фотографиям, находящимся в папке «двукратные фотографии» (ссылка на фотографии дана в конце описания), необходимо определить скорость движения ДГ и величину импульсного поля. Пример двукратной фотографии показан на Рис. 14. На всех фотографиях этой серии граница движется справа налево. Горизонтальный размер всех фотографий 470 мкм. Задержка между первым и вторым импульсами света 13 нс, длительность каждого импульса света $\frac{1}{4}$ нс. Величина импульсного магнитного поля указана в названии фотографии. Например, фотография «32.70e-1» получена в присутствии импульсного магнитного поля с амплитудой 32,7 Э.

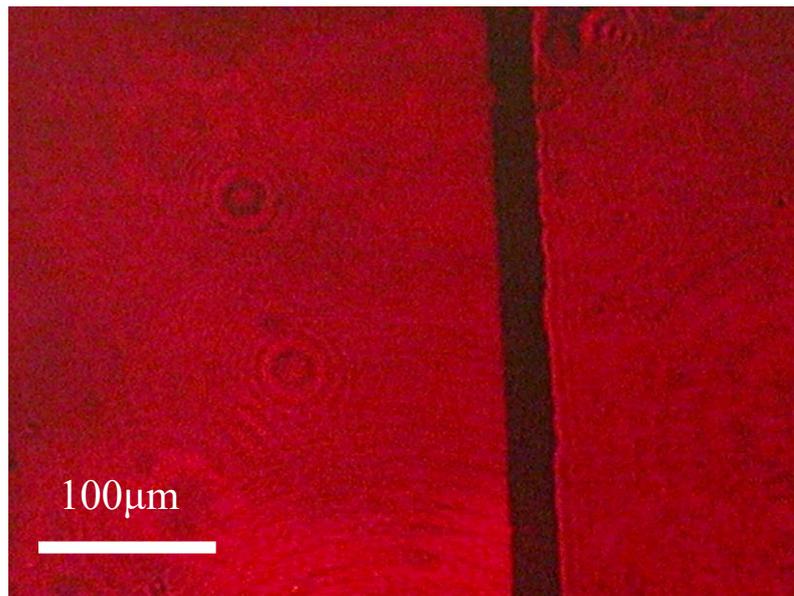


Рис. 14: Двукратная фотография динамической доменной границы в пленке феррита-граната. Граница движется справа налево под действием импульсного магнитного поля с амплитудой 78,5 Э. Задержка между первым и вторым импульсами света 13 нс.

По результатам измерений можно построить зависимость скорости движения доменной границы V от величины импульсного поля H_{coil} . Начальный участок зависимости $V(H_{coil})$ описывается линейной функцией:

$$V = \mu \cdot H_{coil}, \quad (18)$$

где μ – подвижность доменной границы.

Заключение

В первом упражнении необходимо:

- определить величину плоскостной компоненты постоянного магнитного поля, создаваемого градиентными магнитами H_y^{\parallel} (п. 1.1);
- по однократным фотографиям динамической доменной границы получить зависимость смещения границы под действием импульса магнитного поля от времени $y(t)$ (п. 1.2);
- по начальному линейному участку этой зависимости, определить скорость движения доменной границы V (п. 1.2);
- провести моделирование динамики доменной границы под действием градиентного и импульсного магнитного полей ДГ при ее движении из положения равновесия (п. 1.3). Результаты расчетов представьте в виде зависимостей $V(y)$ и $y(t)$. Последнюю зависимость можно преобразовать к виду $y(t)/y_{max}$ и сравнить с аналогичной экспериментальной кривой, полученной в п.1.2.

Во втором упражнении необходимо:

- определить скорость движения доменной границы по двукратным фотографиям, полученным для разных величин импульсных магнитных полей, и построить зависимость скорости движения доменной границы от величины внешнего магнитного поля $V(H_{coil})$;
- вычислить значение подвижности доменной границы μ_3 ;
- используя значения параметров пленок ферритов-гранатов из работы [5], вычислить максимальное и минимальное значение подвижности и сравнить с ранее полученным результатом.

Список литературы

1. М.А. Шамсутдинов, И.Ю. Ломакина, В.Н. Назаров, А.Т. Харисов. “Ферро- и антиферродинамика”. Наука. 2009.
2. В.Г. Барьяхтар, Б.А. Иванов, М.В. Четкин. “Динамика доменных границ в слабых ферромагнетиках”. УФН, т.146, с.417-458, 1985.
3. Kim K.-J.; Kim S. K.; и др. Fast domain wall motion in the vicinity of the angular momentum compensation temperature of ferrimagnets. Nature Materials, Volume 16, Issue 12, pp. 1187-1192, 2017.
4. Герасимов М.В., Ильин С.В., Логунов М.В., Никитов С.А., Спириин А.В., Чалдышкин А.В. “Магнитооптическая установка для исследования временной эволюции нанометровых смещений доменных границ при импульсном намагничивании”. Приборы и техника эксперимента, № 5, с. 106–111, 2017.
5. В. А. Боков, В. В. Волков, “Динамика доменной стенки в ферромагнетиках”, ФТТ, том 50, № 2, с. 193 – 221, 2008.

Ссылка на интерактивную версию задачи и фотографии:

http://magn.ru/prakt/online/domain_dyn.html