

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.62

### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЮЩЕГО ИМПУЛЬСА МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЫ

© 2022 г. Т. Б. Шапаева<sup>а, \*</sup>, А. Р. Юмагузин<sup>б</sup>, Ю. Н. Курбатова<sup>а</sup>, Р. М. Вахитов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>Башкирский государственный университет, ул. Заки Валиди, 32, Уфа, 450076 Россия

\*e-mail: shapaeva@mail.ru

Поступила в редакцию 19.06.2021 г.

После доработки 29.09.2021 г.

Принята к публикации 01.10.2021 г.

Рассмотрено влияние параметров управляющего импульса магнитного поля, имеющего форму прямоугольной трапеции, на динамику доменных границ в ферритах-гранатах и ортоферритах. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными, полученными с помощью метода высокоскоростной фотографии. Показано, что в материалах, где скорость движения доменных границ не превышает нескольких сот метров в секунду, длительность переднего фронта управляющего импульса менее 80 нс не оказывает существенного влияния на динамику границы. Если скорость движения границы составляет несколько километров в секунду, длительность переднего фронта 50 нс приводит к долговому разгону границы до максимальной скорости и сокращает время движения границы с этой скоростью, ограничивая возможности дополнительного управления динамикой границы. Показано, что слишком большая длительность переднего фронта импульса может привести к снижению максимальной скорости движения доменной границы и ее подвижности, которые измерены экспериментально. Слишком короткий управляющий импульс с фиксированной амплитудой приводит к уменьшению максимального смещения границы и, как следствие, к сокращению времени движения с постоянной скоростью, соответствующей данной амплитуде управляющего импульса.

*Ключевые слова:* динамика доменных границ, импульсное магнитное поле, высокоскоростная фотография, моделирование

DOI: 10.31857/S0015323022030111

#### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что перемагничивание ферромагнетиков в слабых магнитных полях непосредственно связано с движением доменных границ (ДГ). Разные материалы демонстрируют разные скорости движения границ: от нескольких метров в секунду в Fe–Ni проволоках [1], нескольких десятков метров в секунду в ферритах-гранатах [2], нескольких сотнях метров в секунду в соединении GdFeCo [3], нескольких километров в секунду в борате железа [4] и в ферритах-гранатах в присутствии постоянного плоскостного магнитного поля [5], до величин свыше 10 км/с, например, в микропроводах [6]. Максимальную на сегодняшний день скорость движения ДГ 20 км/с наблюдали в ортоферритах [2, 7]. Чем выше скорость движения доменной границы в веществе, тем меньше время перемагничивания. Это особенно важно для практического применения ферромагнитных материалов.

Для исследования динамики ДГ может быть использовано переменное гармоническое [8, 9] или импульсное магнитное поле, которое может быть создано с помощью прямого провода [3] или катушек [2, 5, 10]. Исследования динамики перемагничивания можно проводить на доменной структуре, содержащей несколько доменов [8–10], или на единственной ДГ, которую специально создают в начале каждого эксперимента [1] или стабилизируют ее начальное положение с помощью градиентного магнитного поля [5]. В первом случае при исследовании динамики на доменной структуре скорости движения границ обычно невелики и не превышают нескольких метров в секунду. С точки зрения практического применения интерес представляют в основном более высокие скорости движения ДГ порядка километров в секунду и выше. Как правило, для наблюдения таких высоких скоростей в образце создают единственную ДГ, положение которой фиксируют с помощью градиентного магнитного поля. Именно это поле га-

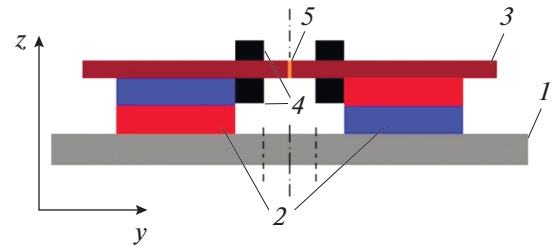
рантирует повторяемость экспериментов и надежность получаемых результатов.

Для исследования динамики ДГ можно использовать разные методы: метод Сикстуса–Тонкса [1] и его магнитооптические аналоги [2, 11]; метод коллапса цилиндрических магнитных доменов [12]; методы однократной и двукратной высокоскоростной фотографии [2]; метод, основанный на эффекте Холла [3]; а также метод, в котором используется дифракция света на доменной структуре [10]. Увидеть динамическую ДГ позволяют только методы высокоскоростной фотографии.

Моделирование динамики ДГ под действием импульсного и градиентного магнитных полей в ортоферритах и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными ранее было проведено авторами работы [13]. Цель настоящей работы в рамках продолжения ранее начатых исследований – изучить влияние параметров управляющего импульса, таких как длительность самого импульса и его переднего фронта, на динамику ДГ в ферритах-гранатах и ортоферритах, а также определить оптимальные характеристики импульса поля для реализации максимальной скорости движения ДГ в условиях реального эксперимента. Напомним, что в указанных материалах скорость движения ДГ может принимать разные значения от нескольких метров в секунду до 20 км/с, что позволяет обобщить полученные выводы практически на все материалы, в которых изучают движение ДГ.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Для исследования динамики ДГ в ферритах-гранатах и ортоферритах был использован метод высокоскоростной фотографии [2, 5]. Положение единственной ДГ фиксировали с помощью градиентного магнитного поля, которое создавали с помощью постоянных магнитов, расположенных на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга (рис. 1). Величина этого поля составляла от нескольких сот Эрстед на сантиметр (в ортоферритах) до нескольких десятков килоЭрстед на сантиметр (в ферритах-гранатах). Таким образом, движение ДГ происходит под действием магнитного поля, которое является суперпозицией импульсного и градиентного полей. Помимо компоненты градиентного поля, перпендикулярной плоскости образца, постоянные магниты создают компоненты, ориентированную в плоскости образца, перпендикулярно плоскости доменной границы. Величина плоскостной компоненты градиентного поля зависит от характеристик постоянных магнитов и расстояния между ними. В условиях эксперимента величина плоскостной компоненты градиентного поля составляет от нескольких сот до нескольких тысяч Эрстед. Наличие плоскостной компоненты градиентного поля влияет на характер динамики ДГ. В пленках ферритов-гранатов пост-



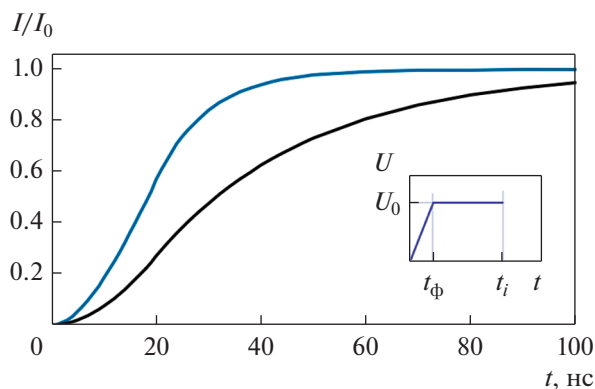
**Рис. 1.** Использование градиентного магнитного поля для создания единственной доменной границы: 1 – подложка, 2 – постоянные магниты, создающие градиентное магнитное поле, 3 – образец, 4 – катушки, которые создают импульсное магнитное поле, управляющее движением доменной границы (5).

янное плоскостное магнитное поле стабилизирует структуру ДГ и позволяет разогнать ее до скорости в несколько километров в секунду, что на несколько порядков превышает скорости, характерные для этих материалов [5].

Ранее было отмечено, что для управления динамикой ДГ используют магнитное поле, создаваемое прямым проводом [3] или соосными катушками, которые размещают на поверхностях образцов [7]. Даже если импульс напряжения имеет идеальную прямоугольную форму, передний фронт импульса тока, а соответственно, и импульса магнитного поля, будет деформирован из-за индуктивности провода или катушек. Чем больше индуктивность, тем больше будет длительность переднего фронта импульса магнитного поля. Следует отметить, что индуктивность провода значительно меньше, чем индуктивность катушек, однако поле провода неоднородно и сильно зависит от расстояния от него [14]. Это создает определенные трудности при интерпретации экспериментальных данных и вычислении динамических параметров магнитных материалов.

В наших экспериментах магнитное поле, управляющее движением ДГ, создавали с помощью двух соосных катушек, расположенных на поверхностях образца (рис. 1). Катушки были изготовлены из медного изолированного провода толщиной 30 мкм, в зависимости от исследуемого материала катушки имели от 10 до 50 витков, внутренний диаметр 1.5–2 мм и высоту от десятых долей до нескольких миллиметров. Индуктивности катушек, используемых в экспериментах, были вычислены на основе работы [15] и составляли от 0.5 до 1.5 мкГн.

Для создания управляющего магнитного поля в катушки подавали импульс напряжения, который имел форму прямоугольной трапеции с передним фронтом длительности  $t_{\phi} = 20$  нс (вставка к рис. 2). Изменение амплитуды импульса практически не меняло длительность его переднего фронта. Импульс напряжения такой формы, при-



**Рис. 2.** Зависимости относительной величины силы тока от времени, вычисленные по формуле (1). Расчеты выполнены для импульса напряжения, представленного на вставке, с передним фронтом  $t_{\phi} = 20$  нс, индуктивности катушек: 0.5 мкГн – синяя и 1.5 мкГн – черная кривая.

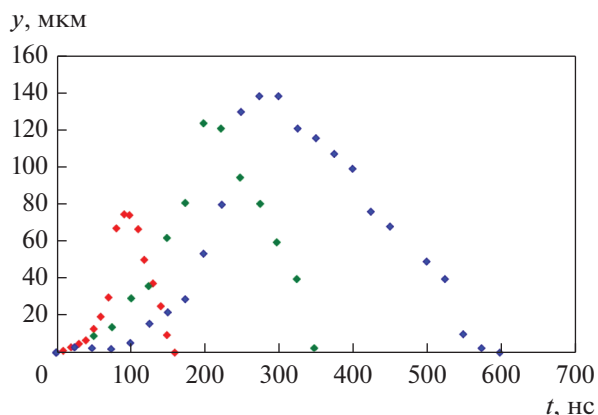
ложенный к катушке, приводит к плавному возрастанию тока в цепи. На рис. 2 представлена зависимость относительной величины силы тока от времени  $I/I_0(t)$  для разных значений индуктивности катушки  $L$ , вычисленная по формуле

$$\frac{I}{I_0}(t) = \begin{cases} \frac{L}{Rt_{\phi}} \left( e^{-\frac{R}{L}t} - 1 \right) + \frac{t}{t_{\phi}}, & \text{при } t \leq t_{\phi} \\ 1 + \frac{L}{Rt_{\phi}} \left( e^{-\frac{R}{L}t_{\phi}} - 1 \right) e^{-\frac{R}{L}(t-t_{\phi})}, & \text{при } t > t_{\phi} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $R = 50$  Ом – сопротивление согласования схемы, которое значительно превышает сопротивление катушек. Представленные на рис. 2 кривые получены для индуктивности катушек 0.5 и 1.5 мкГн. Чем больше индуктивность катушки, тем более плавно со временем возрастает относительная величина тока.

Время нарастания тока до 90% от максимального значения составляет 46 и 80 нс для катушек с индуктивностью 0.5 и 1.5 мкГн соответственно. Таким образом, использование катушек с указанными выше параметрами приводит к увеличению длительности переднего фронта исходного импульса в 2.5–4 раза.

Важной характеристикой управляющего импульса магнитного поля является не только длительность его переднего фронта, но и длительность самого импульса. На рис. 3 показана зависимость смещения доменной границы от времени под действием импульса магнитного поля с амплитудой 30 Э. Представленные результаты получены методом высокоскоростной фотографии для пластинки ортоферрита иттрия, вырезанной перпендикулярно оптической оси. Начальное положение ДГ стабилизирует градиентное поле 1300 Э/см. Под действием импульса магнитного поля в течение



**Рис. 3.** Зависимость смещения доменной границы от времени под действием импульса магнитного поля с амплитудой 30 Э, длительность переднего фронта 30 нс, длительность импульса 0.1 (красные точки), 0.2 (зеленые точки) и 0.3 мкс (синие точки). Результаты получены методом высокоскоростной фотографии в пластинке ортоферрита иттрия, вырезанной перпендикулярно оптической оси.

нескольких десятков наносекунд ДГ разгоняется до максимальной скорости порядка 2 км/с, достигает максимального смещения из положения равновесия и возвращается в исходную позицию с постоянной скоростью. При движении под действием импульса с максимальной длительностью, ДГ задерживается в точке максимального смещения на некоторое время (порядка 10 нс). Поскольку амплитуда импульса поля во всех случаях одинакова, а максимальное смещение ДГ из положения равновесия возрастает при увеличении длительности импульса, использование импульсов короче 0.3 мкс для управления динамикой ДГ в этом материале нецелесообразно. Возвращение ДГ в исходное положение после окончания действия импульса поля происходит под действием градиентного магнитного поля. Время возвращения сравнимо с длительностью возбуждающего импульса поля. При обратном движении скорость границы составляет 500–800 м/с. Время возвращения системы в исходное состояние определяет максимальную частоту, которую можно использовать для повторения управляющих импульсов для надежной работы установки в целом. Поскольку слишком высокая частота повторения импульсов напряжения приводит к повреждению катушек, обычно в эксперименте используют частоту порядка нескольких Герц.

Слишком короткий управляющий импульс магнитного поля не только ограничивает максимальное смещение ДГ из положения равновесия, но и сокращает время движения границы с постоянной скоростью. Эта скорость является максимальной для данной амплитуды импульса поля  $H_0$ . Корот-

кое время движения ДГ с максимальной скоростью, соответствующей определенной величине  $H_0$ , ограничивает возможности управления динамикой ДГ с помощью дополнительных импульсов магнитного поля [2] или света [16], а также может уменьшать точность измерения скорости при использовании метода двукратной фотографии [7].

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость смещения ДГ из положения равновесия от времени с начала действия импульса напряжения длительности 20 мкс с передним фронтом 20 нс. Измерения были проведены в пленке феррита-граната методом высокоскоростной фотографии [7].

Смещение ДГ на максимальное расстояние происходит в течение нескольких микросекунд с начала действия импульса напряжения. Примерно за 0.2 мкс ДГ разгоняется до максимальной скорости (около 300 м/с), затем в течение нескольких микросекунд сохраняет эту скорость постоянной (начальный линейный участок зависимости) и замедляет свое движение, достигнув максимального смещения, которое определяется соотношением между максимальным значением импульсного и градиентного магнитных полей. После окончания действия импульса ДГ под действием градиентного поля возвращается в исходное положение за несколько десятков микросекунд. В этом случае как и в случае ортоферрита иттрия, управляющие импульсы можно повторять с частотой порядка нескольких Герц.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ

Экспериментальные данные и результаты моделирования смещения ДГ из положения равновесия под действием импульса магнитного поля представлены на рис. 5. В основе моделирования лежит представление о том, что движение доменной границы происходит благодаря балансу нескольких сил. Одна из них, вызывающая движение границы, пропорциональна амплитуде импульсного магнитного поля; другая, связанная с градиентным полем, старается вернуть границу в исходное положение равновесия; и еще одна сила, определяющая движение ДГ – сила трения. Величина этой силы пропорциональна скорости движения границы. Ранее аналогичный подход уже был использован авторами работы [17] для описания динамики ДГ цилиндрических доменов в пленках ферритов-гранатов под действием постоянного магнитного поля. Скорость движения доменных границ в этом случае не превышала нескольких метров в секунду, и форму управляющего импульса поля детально не рассматривали. В нашем случае ДГ движется со скоростями от нескольких сот метров в секунду до нескольких километров в секунду, поэтому особое внимание уделено параметрам

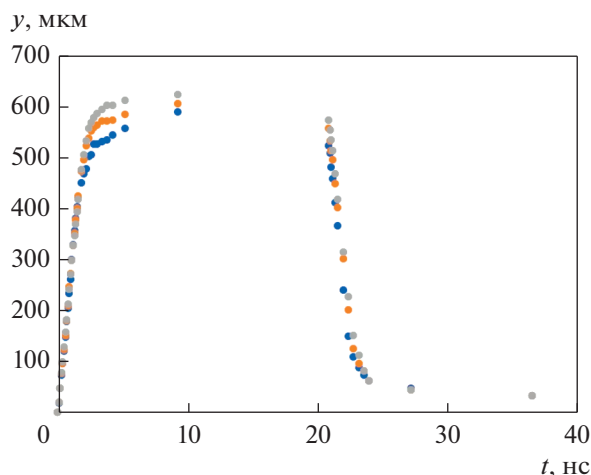


Рис. 4. Экспериментальная зависимость смещения доменной границы из положения равновесия под действием импульса напряжения длительности 20 мкс с передним фронтом 20 нс. Максимальное значение магнитного поля в катушках 200 Э.

управляющего импульса. Несмотря на то, что указанная выше модель не учитывает изменение внутренней структуры динамической ДГ и используется нами для описания движения ДГ и в ферритах-гранатах, и в ортоферрите иттрия, где структура доменных границ существенно отличается [18, 19], результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными.

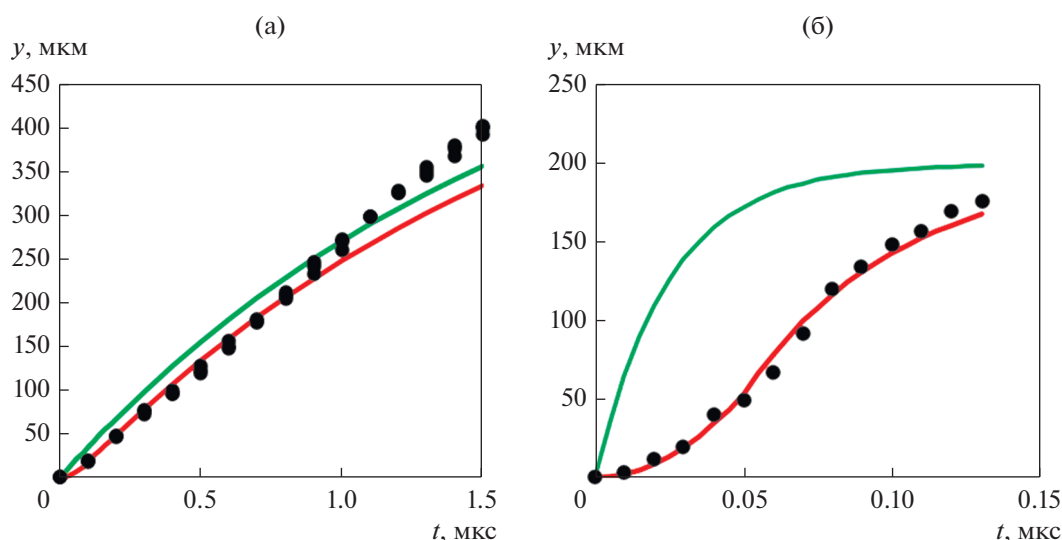
В основе нашего подхода лежит решение задачи Коши:

$$\begin{cases} m\ddot{y} = A(H_0 - Gy - \beta V) \\ y(t=0) = 0 \\ V\left(y_{\max} = \frac{H_0}{G}\right) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $m$  – масса ДГ,  $A$  – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность  $H/\mathcal{E}$ ,  $H_0$  – импульсное магнитное поле,  $G$  – величина градиентного магнитного поля,  $\beta$  – параметр, характеризующий трение, с размерностью  $\mathcal{E} \cdot \text{с/м}$ . ДГ начинает свое движение в точке с координатой  $y=0$  и останавливается в точке максимального смещения из положения равновесия  $y_{\max}$ . Если импульс магнитного поля имеет прямоугольную форму с вертикальным передним фронтом, то смещение ДГ от времени имеет вид

$$y = \frac{H_0}{G}(1 - e^{-\omega t}), \quad (3)$$

$$\text{где } \omega = \frac{A\beta + \sqrt{A^2\beta^2 - 4AGm}}{2m}.$$



**Рис. 5.** Смещение доменной границы из положения равновесия под действием импульса магнитного поля с амплитудой  $H_0$ : экспериментальные данные – точки, результаты моделирования динамики доменной границы: под действием прямоугольного импульса, используя уравнение (3) – зеленая кривая, под действием импульса в форме прямоугольной трапеции с длительностью переднего фронта  $t_\phi$  – красная кривая. (а) феррит-гранат: градиентное магнитное поле  $G = 3.3 \text{ кЭ/см}$ ,  $H_0 = 200 \mathcal{Э}$ ,  $\omega = 0.6 \text{ мкс}^{-1}$ ,  $t_\phi = 80 \text{ нс}$ , скорость движения границы  $300 \text{ м/с}$ . (б) ортоферрит иттрия: градиентное магнитное поле  $G = 300 \mathcal{Э/см}$ ,  $H_0 = 50 \mathcal{Э}$ ,  $\omega = 19 \text{ мкс}^{-1}$ ,  $t_\phi = 50 \text{ нс}$ , скорость движения границы  $2 \text{ км/с}$ .

В реальном эксперименте форму импульса магнитного поля так же, как и импульса тока, можно описать соотношением (1).

На рис. 5 представлены экспериментальные данные (черные точки) и результаты расчетов смещения ДГ из положения равновесия под действием импульса магнитного поля от времени. Расчет смещения границы под действием прямоугольного импульса с вертикальным передним фронтом выполнен, используя уравнение (3) – зеленая кривая. Параметр  $\omega$  определили с помощью метода наименьших квадратов на основе экспериментальных данных. Смещение границы под действием импульса в форме прямоугольной трапеции с передним фронтом длительности  $t_\phi$  (красная кривая) вычислено, используя систему (2).

На рис. 5а представлены экспериментальные результаты и расчетные кривые для ДГ, движущейся в пленке феррита-граната под действием импульса магнитного поля с амплитудой  $H_0 = 200 \mathcal{Э}$  и передним фронтом  $t_\phi = 80 \text{ нс}$ , величина которого определяется индуктивностью используемых катушек. Положение единственной ДГ стабилизировали с помощью градиентного поля  $G = 3.3 \text{ кЭ/см}$ . Максимальная скорость движения ДГ была  $300 \text{ м/с}$ .

Результаты вычислений качественно согласуются с экспериментальными данными. По мере приближения к краю катушки магнитное поле возрастает, форма импульса поля меняется, и результаты моделирования становятся не вполне корректны, поэтому на рис. 5а при достаточно

большом смещении границы из начального положения расчетные кривые лежат ниже экспериментальных точек. В этих условиях ДГ еще некоторое время сохраняет свою скорость на прежнем уровне, что обеспечивает довольно широкий временной интервал для измерения скорости и для управления динамической границей. Красная и зеленая кривая на рис. 5а расположены близко друг к другу, что свидетельствует о том, что увеличение переднего фронта импульса даже в 4 раза до  $80 \text{ нс}$  не оказывает существенного влияния на уменьшение максимальной скорости движения ДГ, соответствующей данной амплитуде импульса магнитного поля.

На рис. 5б представлены данные для ДГ, движущейся в пластинке ортоферрита иттрия, вырезанной перпендикулярно оптической оси. Граница движется под действием импульса магнитного поля с амплитудой  $H_0 = 50 \mathcal{Э}$  и передним фронтом  $t_\phi = 50 \text{ нс}$ , положение единственной ДГ стабилизируют с помощью градиентного поля  $G = 900 \mathcal{Э/см}$ . Максимальная скорость движения ДГ составляет  $2 \text{ км/с}$ . Из рисунка видно, что результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными только в том случае, если учтена форма импульса магнитного поля. Если при фиксированной длительности переднего фронта его амплитуда будет увеличена, максимальная скорость движения ДГ также возрастет и влияние длительности переднего фронта будет более заметным. Следовательно, короткий передний фронт управляющего

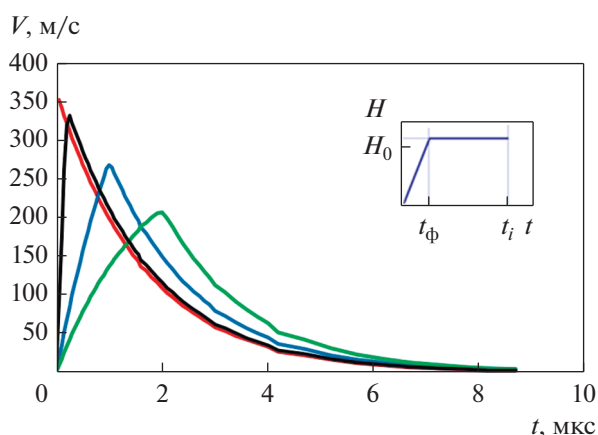
импульса магнитного поля особенно важен в тех материалах, где ДГ движется быстрее 1 км/с.

На рис. 6 показаны расчетные зависимости скорости движения ДГ под действием импульса магнитного поля в форме прямоугольной трапеции с фиксированной амплитудой и разными длительностями переднего фронта, длительность всех импульсов  $t_i = 20$  мкс (см. вставку к рис. 6). Расчеты выполнены для пленки феррита-граната, в которой положение единственной ДГ стабилизировали с помощью градиентного магнитного поля  $3.3 \text{ кЭ/см}$ . Красная кривая показывает идеальный случай прямоугольного импульса, у которого  $t_\phi = 0$ . Чем длиннее передний фронт импульса, тем дольше разгоняется ДГ до максимальной скорости, величина которой больше для импульса с коротким передним фронтом. Следует отметить, что максимальная скорость движения ДГ и в расчетах, и в эксперименте пропорциональна максимальному значению импульсного магнитного поля, что соответствует результатам, описанным в литературе [15, 17, 20].

Известно, что коэффициент пропорциональности между управляющим полем и скоростью движения ДГ — подвижность границы определяется такими характеристиками материала, как константы обменного взаимодействия и анизотропии, а также параметр затухания [20]. Однако в эксперименте, помимо указанных факторов, влияние на измеренную величину подвижности ДГ может оказывать длительность переднего фронта управляющего импульса. При фиксированной амплитуде импульса поля чем длиннее его передний фронт, тем меньше максимальная наблюдаемая скорость движения границы (см. рис. 6), а следовательно, будет меньше ее подвижность. Кроме того, на величину подвижности ДГ, измеренную экспериментально, оказывает влияние и градиентное поле, которое стабилизирует начальное положение границы: чем выше значение градиента, тем сильнее уменьшается измеряемая величина подвижности.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчеты и экспериментальные исследования показали, что при изучении динамики ДГ существенное влияние на получаемые результаты оказывают условия эксперимента, такие как величина градиентного магнитного поля, стабилизирующего начальное положение границы, длительность не только самого управляющего импульса магнитного поля, но и его переднего фронта. Последний параметр определяется не только характеристиками импульса напряжения, но и индуктивностью катушек, создающих управляющее магнитное поле. Слишком слабое градиентное поле не может надежно удержать границу в положении равнове-



**Рис. 6.** Зависимость скорости движения доменной границы от времени при движении под действием импульса с амплитудой  $H_0 = 200$  Э и длительностью  $t_i = 20$  мкс. Форма импульса показана на вставке:  $t_\phi = 0$  — красная кривая;  $t_\phi = 0.2$  мкс — черная кривая;  $t_\phi = 1$  мкс — синяя кривая и  $t_\phi = 2$  мкс — зеленая кривая.

сия, в этом случае начальное положение границы будет нестабильным, и точность определения смещения границы будет низкой. При увеличении градиентного поля для более надежной стабилизации положения равновесия границы, для ее разгона потребуются импульсное поле большей амплитуды. Этого можно достичь путем изменения параметров катушек, создающих это поле. Однако увеличение числа витков в них приводит к росту индуктивности и увеличению длительности переднего фронта управляющего импульса. Последняя характеристика может снижать максимальную скорость движения ДГ, наблюдаемую в эксперименте. Длительность переднего фронта управляющего импульса особенно важна при исследовании динамики ДГ в материалах, где скорость движения ДГ превышает 1 км/с.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, было показано, что при исследовании динамики перемагничивания необходимо учитывать влияние длительности переднего фронта управляющего импульса магнитного поля. В тех материалах, где скорость движения ДГ не превышает нескольких сот метров в секунду, длительность переднего фронта управляющего импульса до 100 нс не оказывает существенного влияния на динамику ДГ. В материалах, где реализуется высокая скорость движения ДГ (более 1 км/с), длительность переднего фронта управляющего импульса поля особенно важна. Было показано, что в этом случае величина  $t_\phi$  порядка 50 нс существенно влияет на динамику ДГ. Чем больше длительность переднего фронта, тем больше время разгона границы до максимальной скорости. По-

сколькx движение границы происходит внутри катушки, размер которой ограничен, слишком долгий разгон может привести к тому, что скорость движения границы так и не достигнет своей максимальной величины, которая соответствует данной амплитуде импульса поля, и ДГ остановится под действием градиентного поля. Увеличение размера катушек, создающих управляющее магнитное поле, приведет к росту их индуктивности, что негативно влияет на форму импульса, увеличивая длительность его переднего фронта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sixtus K.J., Tonks L.* Propagation of Large Barkhausen Discontinuities // *Phys. Rev.* 1931. V. 37. P. 930–958.
2. *Bar'yakhtar V.G., Chetkin M.V., Ivanov B.A., Galdetskii S.N.* Dynamics of Topological Magnetic Solitons (Springer Tracts in Modern Physics, 1994).
3. *Kim K.J., Kim S.K., Hirata Y., Oh S.H., Tono T., Kim D.H., Okuno T., Ham W.S., Kim S., Go G., Tserkovnyak Y., Tsukamoto A., Moriyama T., Lee K.J., Ono T.* Fast domain wall motion in the vicinity of the angular momentum compensation temperature of ferrimagnets // *Nature Materials.* 2017. V. 16. P. 1187–1192.
4. *Четкин М.В., Лыков В.В., Терещенко В.Д.* Ориентационный фазовый переход, индуцированный движущейся доменной границей в борате железа // *ФТТ.* 1990. V. 32. P. 939–941.
5. *Четкин М.В., Курбатова Ю.Н., Шапаева Т.Б.* Динамика доменных границ в пленках ферритов-гранатов в больших плоскостных магнитных полях // *ФТТ.* 2010. V. 52. P. 1795–1797.
6. *Varga R., Zhukov A., Zhukova V., Blanco J.M., Gonzalez J.* Supersonic domain wall in magnetic microwires // *Phys. Rev.* 2007. V. 76. P. 132406.
7. *Барьяхтар В.Г., Иванов Б.А., Четкин М.В.* Динамика доменных границ в слабых ферромагнетиках // *УФН.* 1985. V. 146. P. 417–458.
8. *Кандаурова Г.С.* Новые явления в низкочастотной динамике коллектива магнитных доменов // *УФН.* 2002. V. 172. P. 1165–1187.
9. *Четкин М.В., Шапаева Т.Б., Савченко Л.Л.* Аксиально-симметричные доменные структуры в пленках феррита-граната // *ФТТ.* 2000. V. 42. P. 1287–1290.
10. *Герасимов М.В., Ильин С.В., Логунов М.В., Никитов С.А., Спиринов А.В., Чалдышкин А.В.* Магнитооптическая установка для исследования временной эволюции нанометровых смещений доменных границ при импульсном намагничивании // *Приборы и техника эксперимента.* 2017. № 5. С. 106–111.
11. *Lee E.W., Callaby D.R.* Direct Measurement of the Velocity of Propagation of a Ferromagnetic Domain Boundary in 'Perminvar // *Nature.* 1958. V. 182. P. 254–255.
12. *Konishi S., Miyama T., Ikeda K.* Domain wall velocity in orthoferrites // *J. Appl. Phys. Lett.* 1975. V. 22. P. 258–259.
13. *Шапаева Т.Б., Муртазин Р.Р., Екомасов Е.Г.* Динамика доменной границы под действием импульсного и градиентного магнитных полей в редкоземельных ортоферритах // *Изв. РАН. Сер. физическая.* 2014. V. 78. P. 155–158.
14. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. III. Электричество. М.: Физматлит, 2009. 656 с.
15. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
16. *Prabhakara K.H., Shapaeva T.B., Davydova M.D., Zvezdin K.A., Zvezdin A.K., Davies C.S., Kirilyuk A., Rasing Th., Kimel A.V.* Controlling magnetic domain wall velocity by femtosecond laser pulses // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2021. V. 33. P. 075802.
17. *Малоземов А., Слонзуски Дж.* Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.: Мир, 1982. 382 с.
18. *Волков В.В., Боков В.А.* Динамика доменной стенки в ферромагнетиках // *ФТТ.* 2008. V. 50. P. 193–221.
19. *Четкин М.В., Курбатова Ю.Н., Шапаева Т.Б., Борщевский О.А.* Генерация и гироскопическая квазирелятивистская динамика антиферромагнитных вихрей в доменных границах ортоферрита иттрия // *ЖЭТФ.* 2006. V. 130. P. 181–188.
20. *Шамсутдинов М.А., Ломакина И.Ю., Назаров В.Н., Харисов А.Т.* Ферро- и антиферродинамика. М.: Наука, 2009. 455 с.