

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

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**Использование метода двукратной высокоскоростной фотографии  
для исследования оптического перемагничивания  
пленок ферритов-гранатов**

Выполнил:

Студент 4 курса, 419 группы

Богомолов Андрей Владимирович

\_\_\_\_\_   
подпись студента

Научный руководитель:

к.ф.м.н., с.н.с. Шапаева Татьяна Борисовна

\_\_\_\_\_   
подпись научного руководителя

Допущен к защите \_\_\_\_\_

Зав. кафедрой магнетизма

проф. Перов Н.С. \_\_\_\_\_   
подпись зав. кафедрой

Москва

2018

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава I. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.....	4
1.1 Образцы.....	4
1.2 Методы.....	4
1.2.1 Метод двукратной высокоскоростной фотографии.....	4
1.2.2 Метод накачки-зондирования.....	5
1.2.3 Совмещение двух методов.....	7
1.3. Эксперимент.....	9
Глава II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.....	11
2.1 Исследование влияния импульса накачки на динамическую доменную границу.....	11
2.2 Исследование оптического перемагничивания пленки феррита-граната.....	16
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	23
ВЫВОДЫ.....	24
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	25
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	26

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследование динамических характеристик магнитных материалов – это одна из важнейших задач как прикладной, так и фундаментальной науки. Возможность локального изменения направления намагниченности между двумя устойчивыми состояниями является основным принципом современной технологии записи, хранения и обработки информации. Благодаря прогрессу в развитии фундаментальной науки, в том числе и в области техники эксперимента, за последние десятилетия эта технология претерпела ряд революционных изменений. Сегодня для записи единицы информации требуется время порядка 1 нс, плотность записи при этом составляет около 1 терабит на квадратный дюйм – еще несколько лет назад такие характеристики казались недостижимыми [1]. Интенсивное развитие портативных устройств не дает сомневаться в том, что в экономике будущего спрос на быструю запись информации будет только расти.

В 80-е гг 20 века на кафедре магнетизма физического факультета МГУ для исследования динамики доменных границ и магнитных вихрей был разработан метод двукратной высокоскоростной фотографии. С помощью этого метода было экспериментально показано, что предельная скорость движения доменных границ может достигать 20 км/с [2]. Развитие лазерной техники сделало возможным генерацию импульсов света длительности менее 100 фс. В конце 20 века были впервые проведены эксперименты по воздействию на магнитный порядок ферромагнетика короткими световыми импульсами. Было показано, что время размагничивания составляет порядка 100 пс [3].

Цель настоящей работы – обработка экспериментальных результатов, полученных при исследовании динамики доменных границ в пленке феррита-граната новым методом, который объединяет метод двукратной высокоскоростной фотографии и метод накачка-зондирование.

Эксперименты были проведены в лаборатории под руководством профессора Т. Райзена в Университете имени св. Радбауда, Неймеген, Нидерланды.

## ГЛАВА I. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### 1.1 Образцы

В экспериментах были использованы пленки Bi-содержащего феррита-граната с ориентацией (111). Ферриты-гранаты – магнитные диэлектрики с уникальными свойствами. Для фундаментальных исследований и практического применения важно, что магнитные свойства этих материалов можно менять в широких пределах изменением химического состава и условиями синтеза. Ферриты-гранаты получили широкую известность в 60-е годы 20-го века, их использовали при создании датчиков магнитных полей, в оптических затворах и в системах хранения и обработки информации. В настоящее время пленки ферритов-гранатов используют не только при проведении магнитооптических и оптомагнитных исследований [4, 5], но и в спинтронике [6].

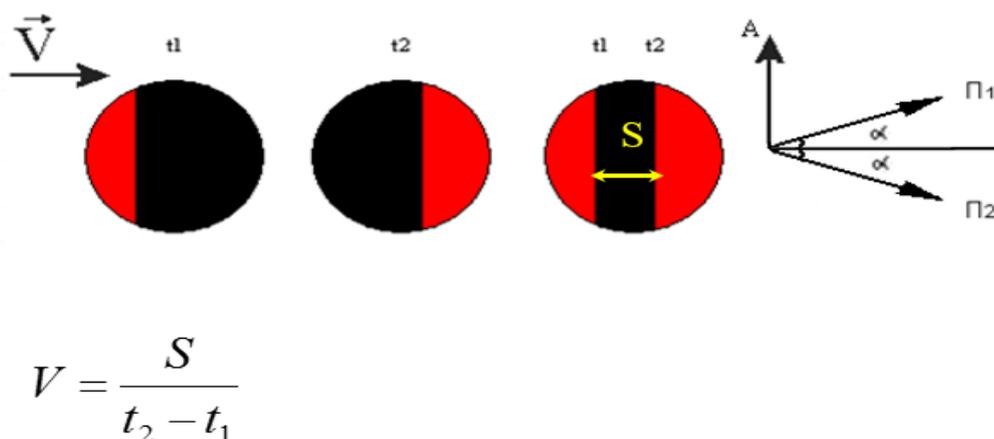
Прозрачность и высокое удельное фарадеевское вращение в видимой области спектра делает эти материалы очень удобными для магнитооптических исследований и демонстраций. Легирование ферритов-гранатов висмутом сильно увеличивает их магнитооптическую активность, при этом увеличение содержания висмута в эпитаксиальной пленке обычно сопровождается ростом поглощения в видимой области спектра [7]. Используемый образец имел максимум добротности на длине волны 800 нм и высокое поглощение на длинах волн <445 нм (Приложение 1) [7, 8].

### 1.2 Методы

#### 1.2.1 Метод двукратной высокоскоростной фотографии

Одним из основных методов исследования динамики доменных границ является метод двукратной высокоскоростной фотографии. Этот метод, основанный на эффекте Фарадея, применим для прозрачных магнетиков. Он позволяет получать фотографии динамической доменной границы в разные моменты ее движения, регулируя задержку между световыми импульсами и

импульсом продвигающего магнитного поля [9]. Единственную доменную границу в образце создают с помощью градиентного магнитного поля. Возможность строгой фиксации начального положения доменной границы обеспечивает повторяемость эксперимента и надежность получаемых результатов. Динамическую доменную границу, движущуюся со скоростью несколько км/с, освещают двумя импульсами света (длительность импульса порядка  $\frac{1}{4}$  нс), один из которых задержан относительно другого на несколько нс. Поляризацию первого и второго луча подбирают таким образом, чтобы изображения ДГ, создаваемые первым и вторым лучом имели обратный контраст (рис. 1). При наложении этих изображений можно определить скорость движения ДГ (Приложение 2) [9, 10, 11].



*Рисунок 1. Измерение скорости движения доменной границы с помощью метода двукратной высокоскоростной фотографии.*

### 1.2.2 Метод накачки-зондирования

В основе метода накачки-зондирования также лежит разделение исходного лазерного импульса на два, однако мощность одного из них значительно больше другого. Первый импульс, более мощный (импульс накачки), возбуждает систему, а второй импульс (зондирования) позволяет регистрировать изменения в системе, вызванные первым импульсом. Этот метод является одним из самых эффективных способов изучения процессов перемагничивания (Рис. 2) [4, 12, 13]. С точки зрения магнетизма оптические импульсы накачки могут привести к сверхбыстрому

размагничиванию, перемагничиванию образца, либо могут возбудить прецессию намагниченности [14].

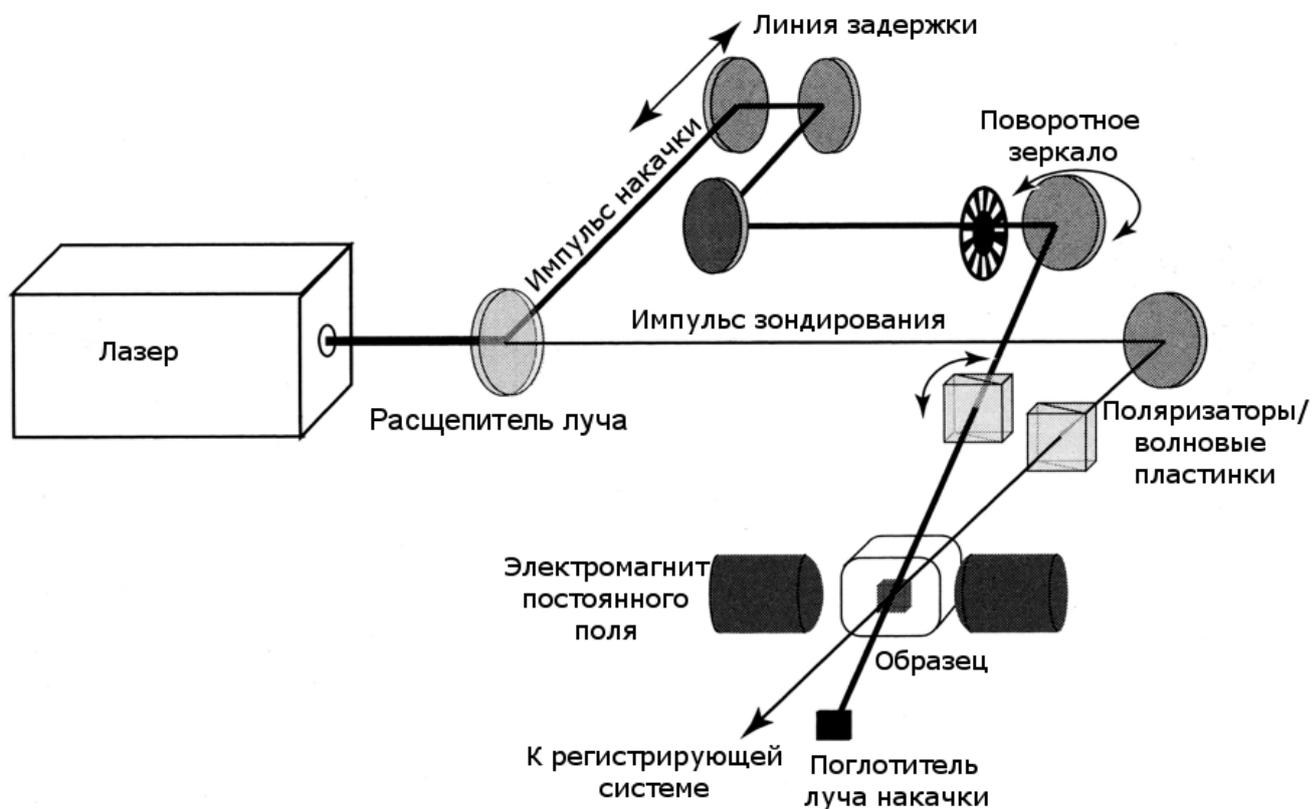


Рисунок 2. Метод накачка-зондирование. Схема установки.

На рисунке 3 представлена схема синхронизации камеры и оптической системы. Частота световых импульсов подобрана так, что изображение доменной структуры после воздействия импульса накачки формируется только каждым тысячным импульсом зондирования.

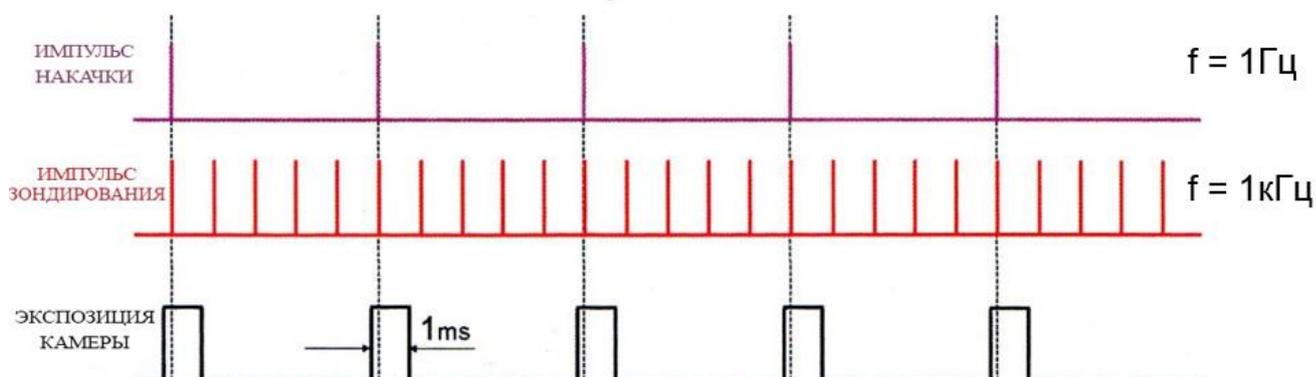


Рисунок 3. Метод накачка-зондирование: схема синхронизации работы камеры и оптической системы.

### 1.2.3 Совмещение двух методов

В настоящем эксперименте были объединены метод накачки-зондирования и двукратной высокоскоростной фотографии. Свет от импульсного лазера был разделен на три луча, мощность одного из них (импульс накачки) была значительно больше мощностей двух других.

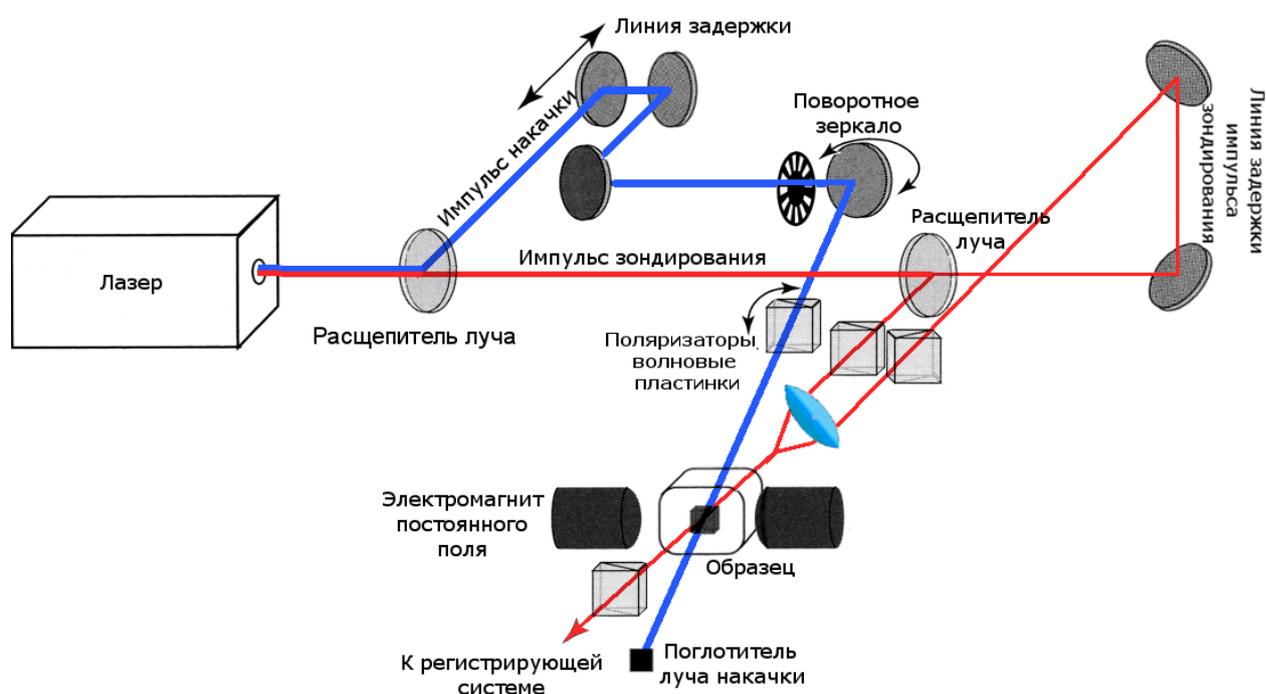


Рисунок 4. Схема установки для исследования динамики доменных границ с помощью нового метода, объединяющего методы двукратной фотографии и накачки-зондирования.

Динамическую доменную границу освещали последовательно импульсом зондирования с длиной волны 800 нм, импульсом накачки с длиной волны 400 нм и еще одним зондирующим импульсом (Рис. 4). Длительность световых импульсов составляла 150 фс. Импульсы накачки и зондирования были сфокусированы в пятна диаметром около 30 мкм и 450 мкм соответственно. Задержка между двумя импульсами зондирования составляла 16 нс, задержку между первым импульсом зондирования и импульсом накачки можно было изменять от 0 до 3 нс. Величину мощности импульса накачки можно было изменять от 0 до 1.5 мВт. Геометрия эксперимента показана на рисунке 5. Таким образом, с помощью импульсов зондирования 1 и 2 был реализован метод двукратной высокоскоростной

фотографии, а импульс накачки и второй импульс зондирования осуществляли методику двухцветной накачки-зондирования. Эксперименты по схеме двухцветной накачки-зондирования обладают рядом преимуществ, среди которых — исключение интерференции между излучением импульса накачки, рассеянным на образце, и импульса зондирования, а также возможность исследования обратных магнитооптических эффектов в широком спектральном диапазоне. Благодаря визуализации динамической доменной границы использованная методика позволяет наблюдать результат воздействия мощного короткого импульса накачки на ДГ в процессе движения.

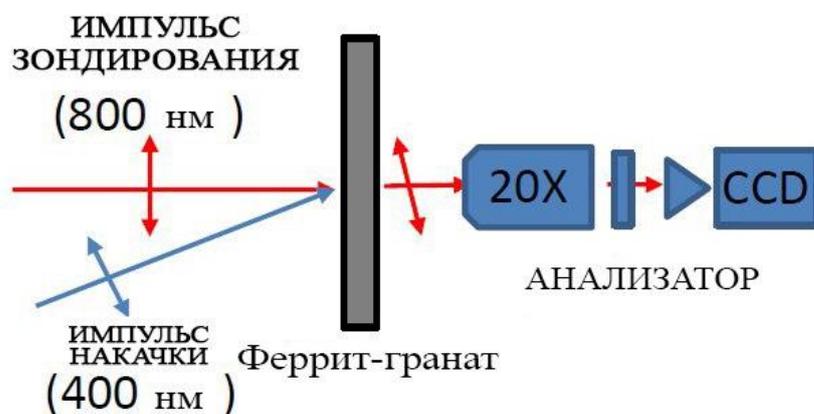


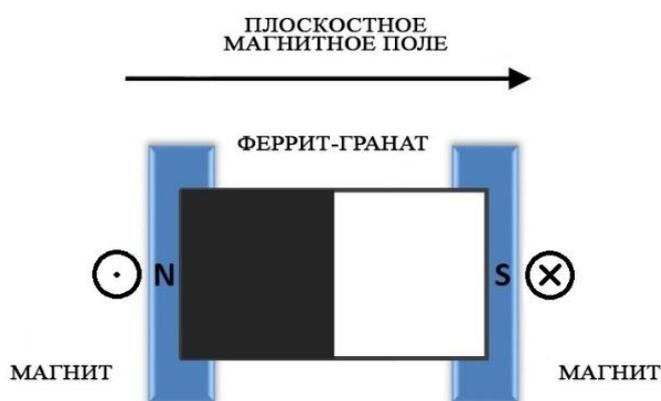
Рисунок 5. Ход лучей в эксперименте.



Рисунок 6. Взаимное расположение импульсов света и магнитного поля.

### 1.3. Эксперимент

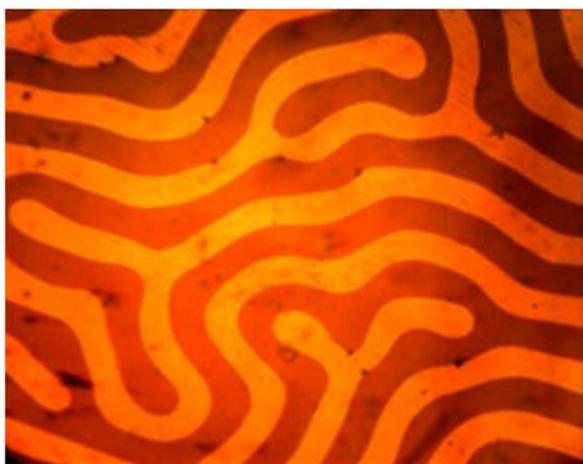
Единственную ДГ в образце создавали с помощью градиентного магнитного



поля (3.3 кЭ/см), перпендикулярного поверхности пленки. Образец находился в постоянном плоскостном поле перпендикулярном плоскости ДГ порядка 1кЭ (рис. 7, 8). Величину этого поля можно было менять.

Рисунок 7. Расположение образца.

В отсутствии поля  $H_{grad}$



В присутствии поля  $H_{grad}$

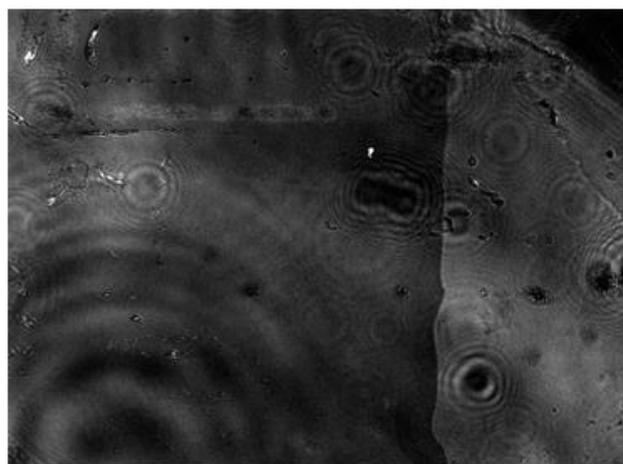


Рисунок 8. Фотографии доменной структуры феррита-граната. Единственная доменная стенка (слева) и лабиринтная структура (справа).

Это поле стабилизировало структуру динамической ДГ и способствовало увеличению ее скорости [15, 16]. Для продвижения ДГ использовали импульсное магнитное поле с амплитудой 900 Э и длительностью 15 мкс, длительность переднего фронта импульса была порядка 20 нс.

Под действием импульсного магнитного поля ДГ начинала свое движение, ее скорость определяли методом двукратной фотографии, фотосъемку проводили в контрасте доменов. При достижении ДГ определенной скорости в промежутке между двумя зондирующими импульсами на динамическую ДГ действовали

мощным возбуждающим импульсом. В эксперименте определяли зависимость влияния импульса накачки разной мощности на ДГ, движущуюся с разными скоростями.

Дополнительно, производили эксперименты по оптическому перемагничиванию образца в отсутствии импульсного поля, в области падения луча накачки. Точка фокусировки луча выбиралась таким образом, чтобы можно было изучить влияние луча накачки как на область образца, намагниченную вверх, так и на область, намагниченную вниз (то есть в светлой и темной контрастных областях). В эксперименте определяли зависимость влияния импульса накачки разной мощности на состояние намагниченности образца в разных плоскостных полях.

Параметры эксперимента для наглядности представлены в таблице.

Описание параметра	Обозначение	Диапазон значений
Задержка между импульсом поля и зондирующим импульсом Probe <sub>1</sub>	$\Delta T_{\text{field}}$	0÷1620 нс
Задержка между первым импульсом зондирования и импульсом накачки	$\Delta T_{\text{pump}}$	0÷3 нс
Величина плоскостного поля	$H_{\text{pl}}$	0.23÷1.15 кЭ
Величина импульсного поля	$H_{\text{imp}}$	900 Э
Мощность импульса накачки	$W_{\text{pump}}$	0÷1.8 мВт
Точки фокусировки лазера на образце	-	Любая точка образца
Длины волн световых импульсов	$\lambda_{\text{pump}}, \lambda_{\text{probe}}$	800 нм, 400 нм
Задержка между двумя импульсами зондирования	$\Delta \tau$	16 нс

## ГЛАВА II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1 Исследование влияния импульса накачки на динамическую доменную границу

В отсутствие импульса накачки при фиксированных величинах импульсного и плоскостного магнитных полей, изменяя задержку между импульсом тока и импульсом света ( $\Delta T_{\text{field}}$ ), получили серию двукратных фотографий (Приложение 4). После обработки этих фотографий определили зависимость скорости движения доменной границы от времени. Эти исследования проводили, для того, чтобы установить соответствие между величиной скорости ДГ и временем задержки  $\Delta T_{\text{field}}$  для дальнейших измерений. Полученные зависимости представлены на рисунке 9.

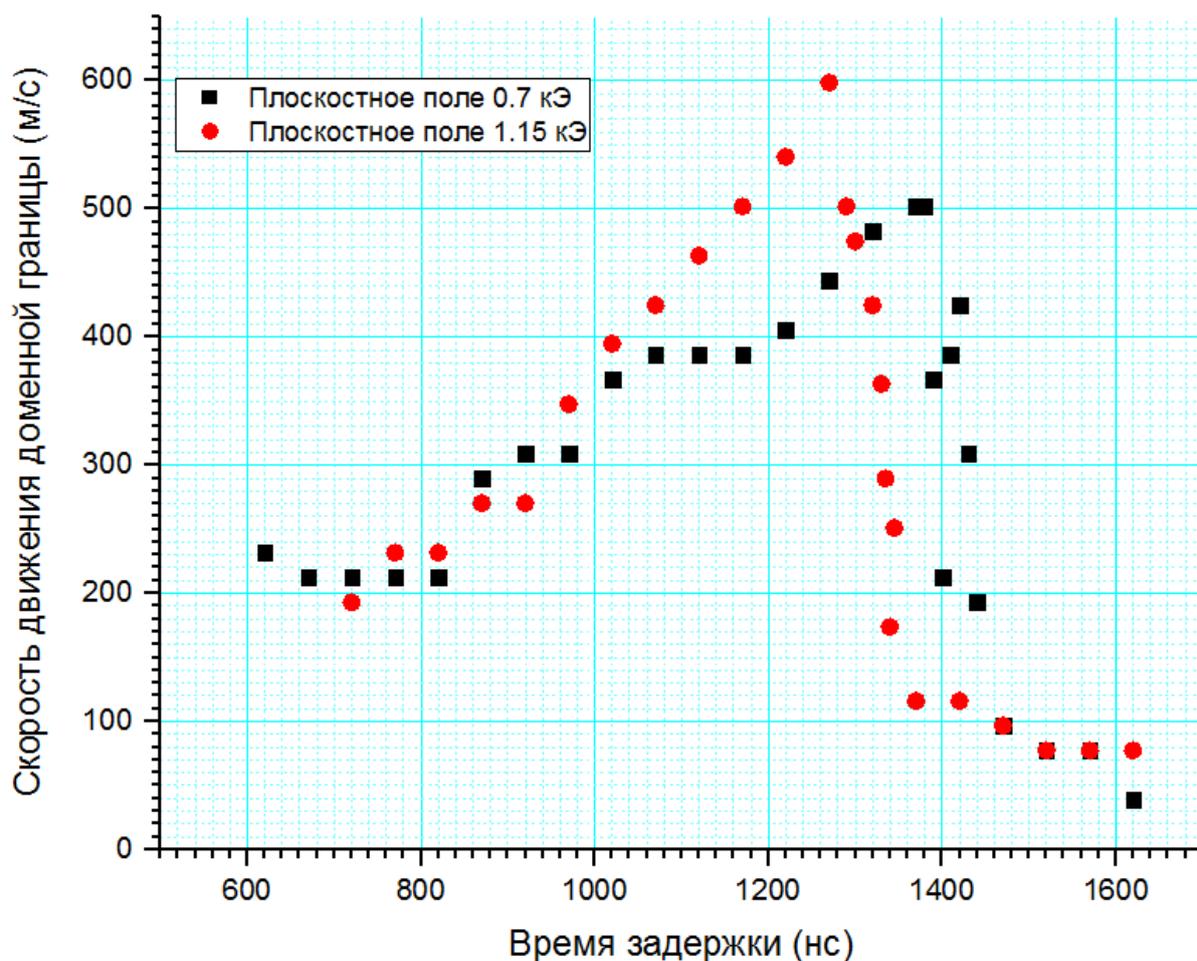


Рисунок 9. Зависимость скорости движения ДГ от времени задержки между импульсом света и импульсом поля. Результаты представлены для различных величин плоскостного поля.

Из графиков видно, что сначала скорость движения ДГ линейно растет и достигает максимальной величины 500 и 600 м/с в присутствии плоскостного поля 0,7 и 1,15 кЭ соответственно. По результатам этих измерений определили задержки  $\Delta T_{\text{field}}$ , соответствующие разным скоростям: низкой ( $V^{\text{low}} \approx 300 \text{ м/с}$ ), средней ( $V^{\text{mid}} \approx 400 \text{ м/с}$ ) и высокой ( $V^{\text{high}} \approx 500 \text{ м/с}$ ).

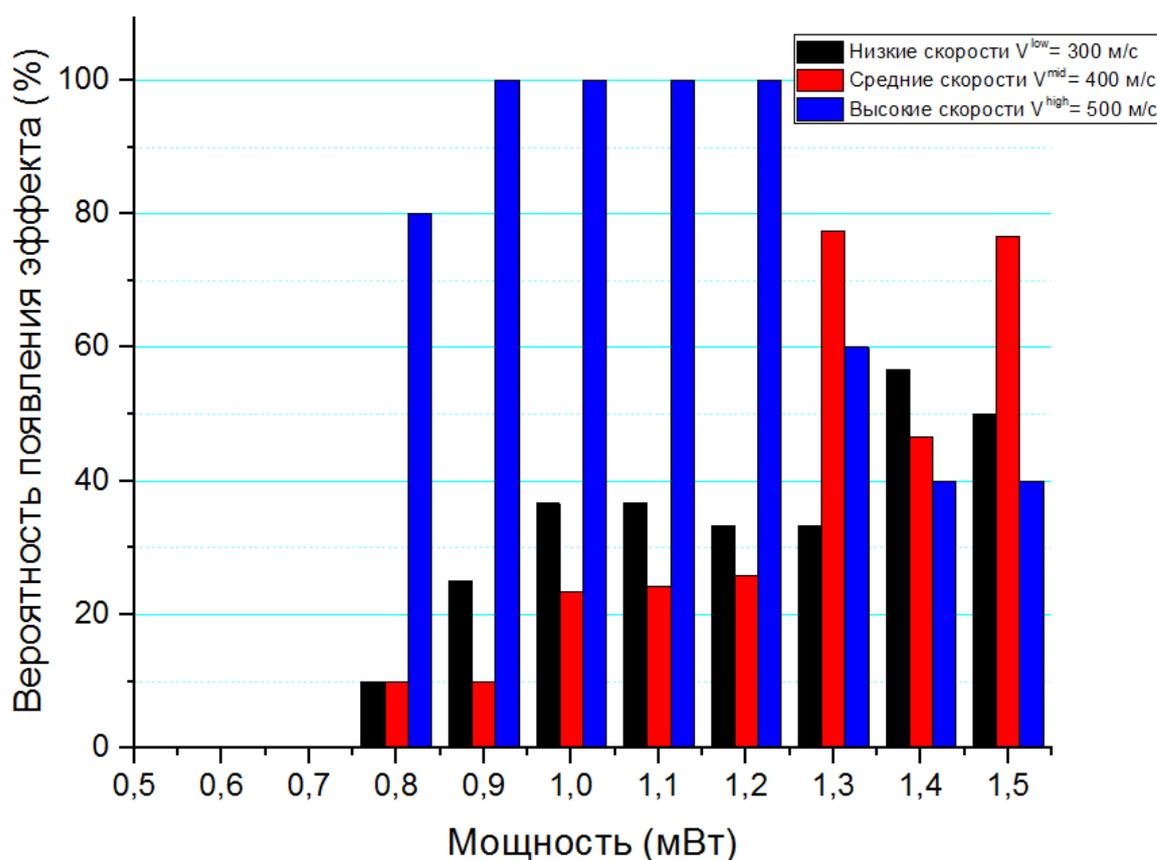
Затем при фиксированной скорости движения ДГ для разных мощностей импульса накачки наблюдали изменение скорости движения ДГ. На рисунке 10 представлены три наблюдаемых состояния динамической ДГ после воздействия импульса накачки:



Рисунок 10. Наблюдаемые проявления эффекта взаимодействия динамической доменной границы и импульса накачки. Скорость движения ДГ 400 м/с,  $H_{pl} = 0,7 \text{ кЭ}$ ,  $W_{\text{pump}} = 1.3 \text{ мВт}$ .

- А) Тот факт, что ширина вертикальной темной полосы постоянна по всей длине, свидетельствует о том, что ДГ движется с постоянной скоростью - эффект отсутствует.
- Б) Если ширина вертикальной темной полосы в области действия импульса накачки уменьшается наблюдается эффект локального «торможения» ДГ.
- В) Если ширина вертикальной темной полосы в области действия импульса накачки увеличивается наблюдается эффект локального «ускорения» ДГ.

Вероятность наступления эффекта для разных скоростей движения ДГ и разных мощностей импульса накачки показана на рис. 6. Импульсы накачки, мощность которых была менее 0,8 мВт, не влияли на скорость движения ДГ. Под действием импульса накачки от 0,8 до 1,2 мВт наблюдается устойчивое воздействие на ДГ, движущуюся с высокой скоростью. В этом диапазоне мощностей вероятность наблюдения эффекта изменения скорости движения ДГ движущейся с малой и средней скоростью не превышает 40%. При увеличении мощности импульса накачки вероятность наблюдения эффекта на низких и средних скоростях немного возрастает, а на высоких скоростях падает. Такой характер зависимости можно связать с изменением структуры динамической доменной границы под действием возбуждающего импульса.



*Рисунок 11. Зависимость вероятности появления эффекта от мощности импульса накачки.*

Исследование влияния импульса накачки на динамическую ДГ показало, что это влияние может приводить к локальному «ускорению» или «торможению» ДГ.

Поскольку эффект нестабилен, для однозначной интерпретации полученных результатов были получены зависимости изменения скорости от мощности импульса накачки для разных скоростей движения ДГ (рис. 12 – 14). Из графиков видно, что при низких скоростях движения ДГ вероятности торможения и ускорения примерно равны. Разница в амплитудах объясняется диапазоном изменения (торможение ограничено снизу соответствующей диапозону максимальной скоростью). На средних скоростях картина, в целом, сохраняется. На высоких скоростях преобладает эффект локального ускорения. Полученный результат согласуется с объяснением проявления эффекта, данным ниже.

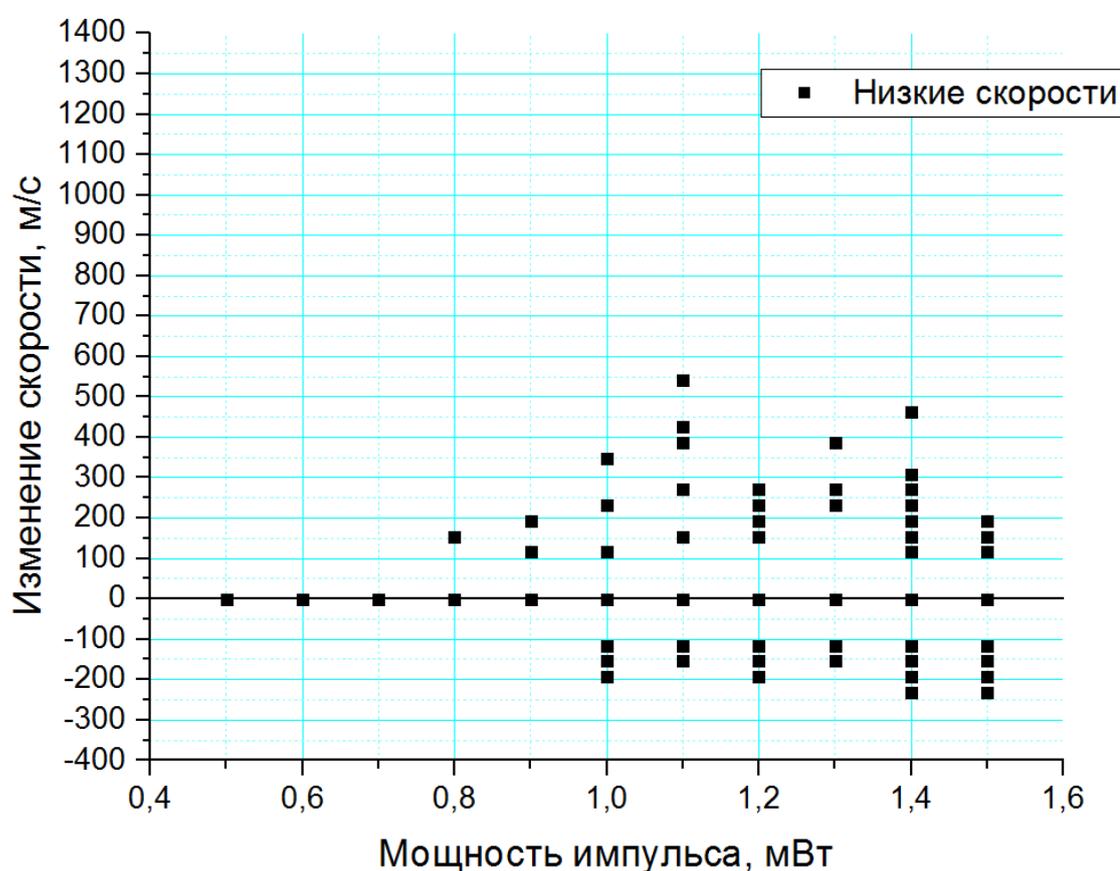


Рисунок 12. Зависимость величины эффекта от мощности импульса накачки при высоких скоростях движения ДГ.

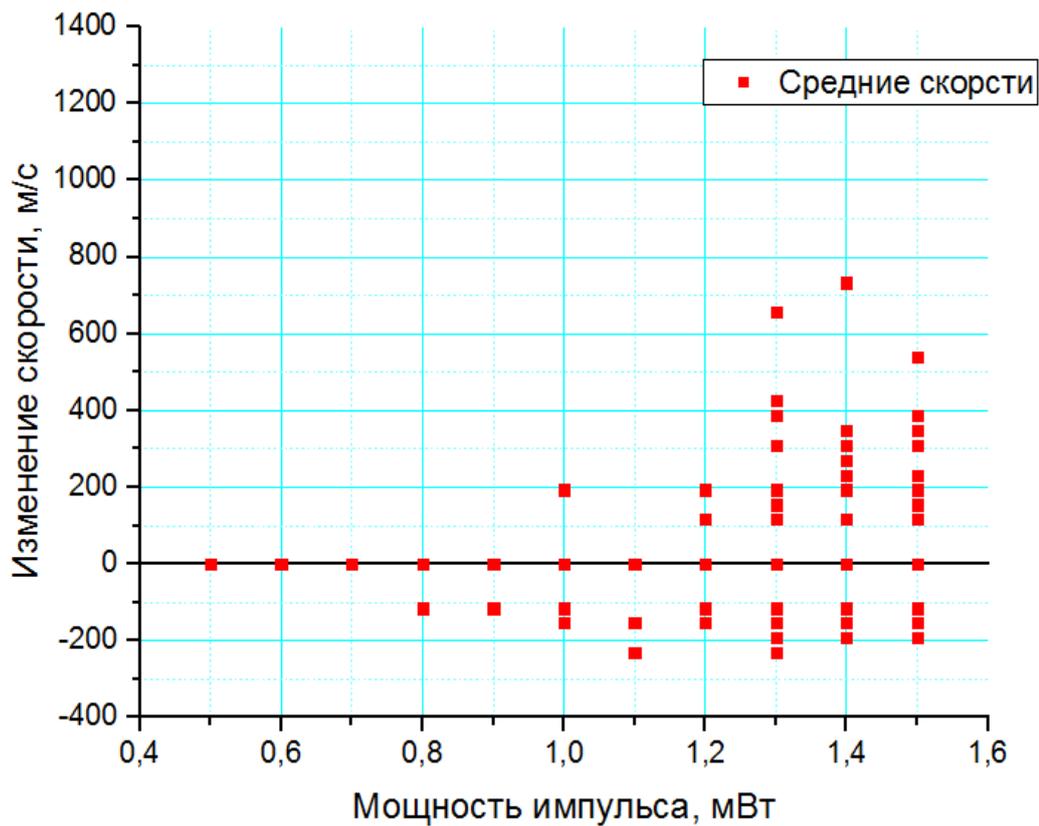


Рисунок 13. Зависимость величины эффекта от мощности импульса накачки при средних скоростях движения ДГ.

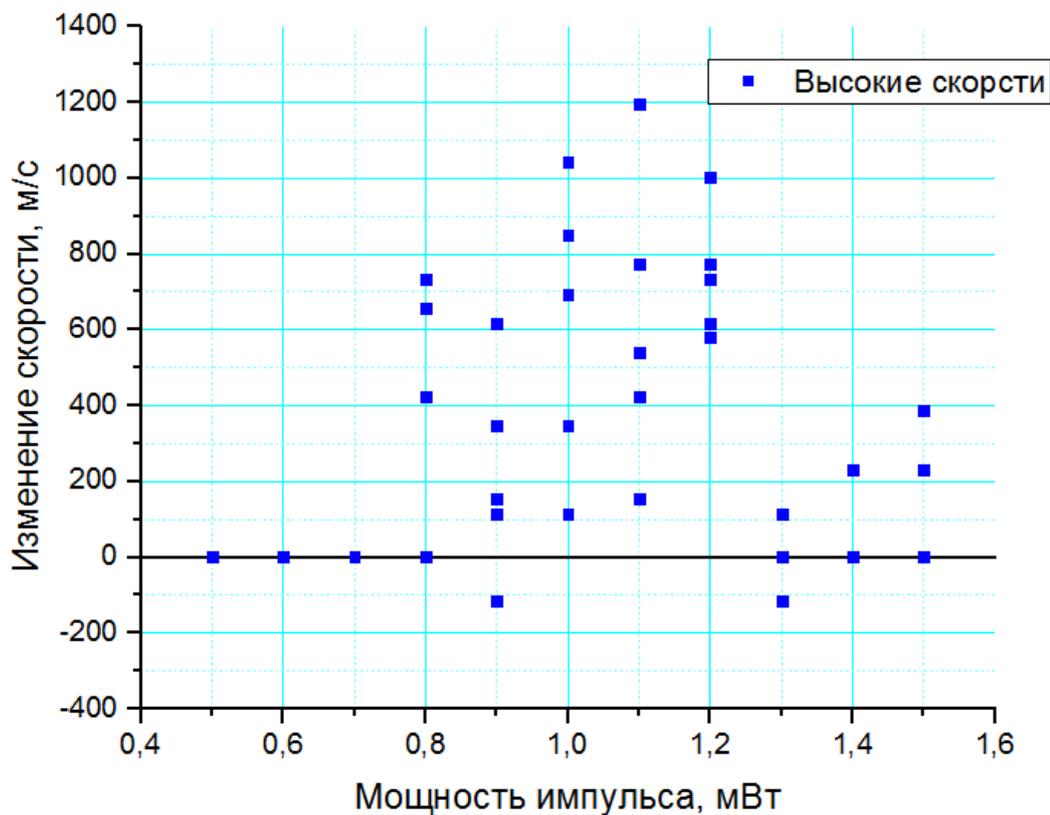


Рисунок 14. Зависимость величины эффекта от мощности импульса накачки при высоких скоростях движения ДГ.

Два различных проявления наблюдаемого эффекта были объяснены взаимным пространственным расположением доменной границы и импульса накачки. Импульс накачки вызывал локальное перемагничивание образца. Перемагниченная область имела на фотографии такой же цвет, как один из доменов, что на фотографии выглядело как ускорение или торможение ДГ (рис. 15). Было установлено, что поляризация импульса накачки не влияет на проявление эффекта, что говорит о чисто тепловой природе изучаемого явления.

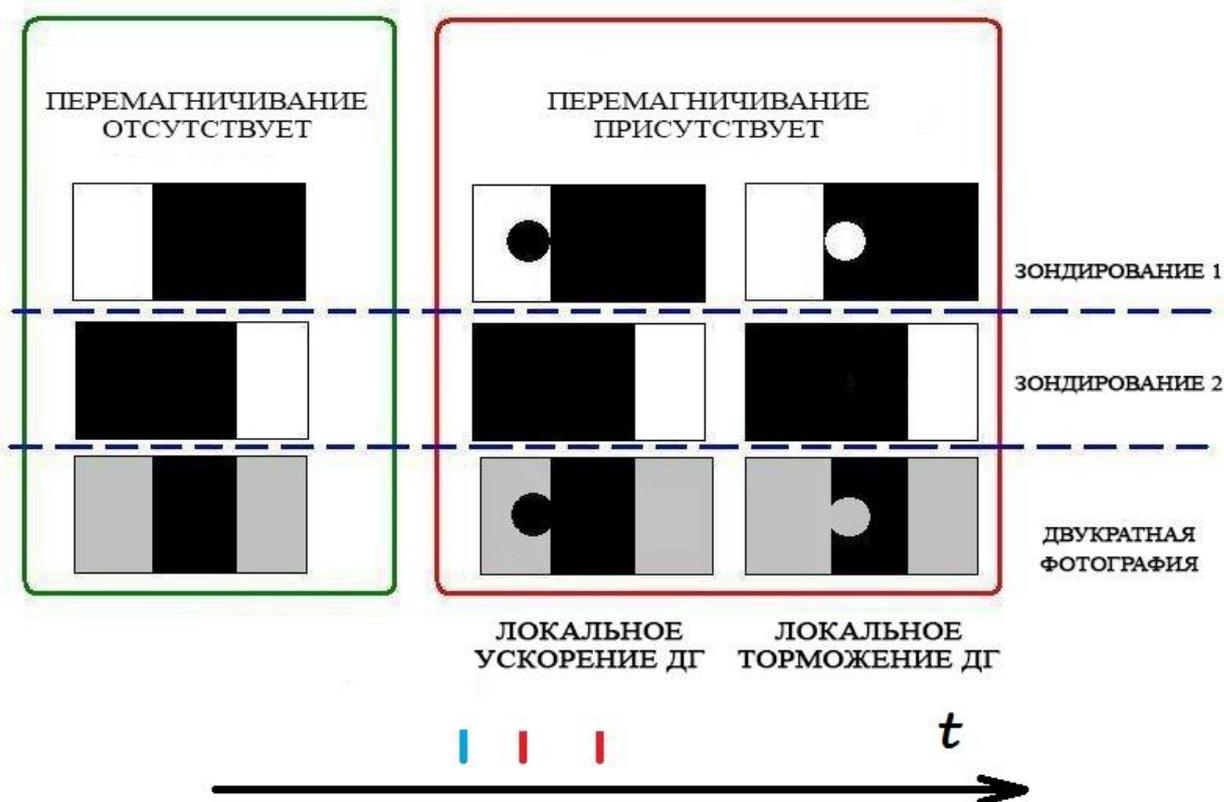


Рисунок 15. Схема, иллюстрирующая локальное ускорение и торможение доменной границы, после действия на нее импульса накачки.

## 2.2 Исследование оптического перемагничивания пленки феррита-граната в присутствии плоскостного магнитного поля

Поскольку основной причиной изменения скорости движения ДГ под действием импульса накачки является локальное перемагничивание, была исследована структура перемагниченной области в отсутствии движения ДГ. Эти

эксперименты, так же, как и описанные выше исследования влияния импульса накачки на динамическую ДГ, проводили в присутствии градиентного и плоскостного магнитного поля, импульсное магнитное поле, ориентированное вдоль нормали к поверхности образца в данном случае, не использовали. Для достижения поставленной цели была составлена карта-схема воздействия импульса накачки на домены с разным направлением намагниченности, на основе которой были получены зависимости площади перемагниченной области от мощности импульса накачки и величины плоскостного магнитного поля. [17, 18]

На рис.16 представлена карта-схема, иллюстрирующая влияние импульса накачки на домены с разным направлением намагниченности.

Согласно полученным результатам, перемагниченная область имеет форму круга с небольшой эллиптичностью. С возрастанием мощности и/или величины плоскостного поля круглая область переходит в систему концентрических колец с противоположной намагниченностью, сменяющих друг друга с периодом  $\sim 4.5$  мкм. Кроме того, было обнаружено, что при плоскостных полях выше  $-0.23$  кЭ эффект, в исследованном диапазоне мощности импульса накачки, не проявляется (см. вставку на рис. 16).

Перемагниченная область наблюдается при определенном соотношении мощности импульса накачки и величины плоскостного магнитного поля: чем больше величина плоскостного поля, тем при меньших мощностях импульса накачки возникает локальное перемагничивание. При фиксированных величинах плоскостного магнитного поля и импульса накачки размеры перемагниченных областей в доменах с противоположной намагниченностью практически не отличаются.

После тщательной обработки фотографий, представленных на рисунке 16, были получены зависимости площади перемагниченной области от мощности импульса накачки и величины плоскостного магнитного поля (рис. 17-19).

Для всех величин плоскостных полей зависимости площади перемагниченной области ( $S$ ) от мощности импульса накачки ( $W$ ) возрастающие (рис. 17). Необходимая для перемагничивания мощность импульса накачки обратно пропорциональна величине плоскостного поля, а максимально достижимая площадь перемагниченной области прямо пропорциональна ей.

На рисунке 18 представлена зависимость площади перемагниченной области от мощности импульса накачки при фиксированном значении  $H_{pl}=1,15$  кЭ. Измерения площади перемагниченной области проводили на светлом и темном доменах ( $S_{white}$ ,  $S_{black}$ ). Разница между воздействием света на темную или светлую контрастную области пренебрежимо мала.

Зависимость площади перемагниченной области ( $S$ ) от величины плоскостного поля  $H_{pl}$  при фиксированной величине мощности накачки 1,6 мВт представлена на рисунке 19. Площадь перемагниченной области прямо пропорциональна амплитуде плоскостного поля и мощности импульса накачки, существенные отличия между воздействием на темную или светлую контрастную области отсутствуют.

Кроме того, интересно отметить, что при воздействии мощного импульса накачки непосредственно на ДГ, перемагниченная область имеет кольцевую структуру (рис. 20), но на высокоскоростных фотографиях динамической ДГ (рис. 10) это никак не проявляется.

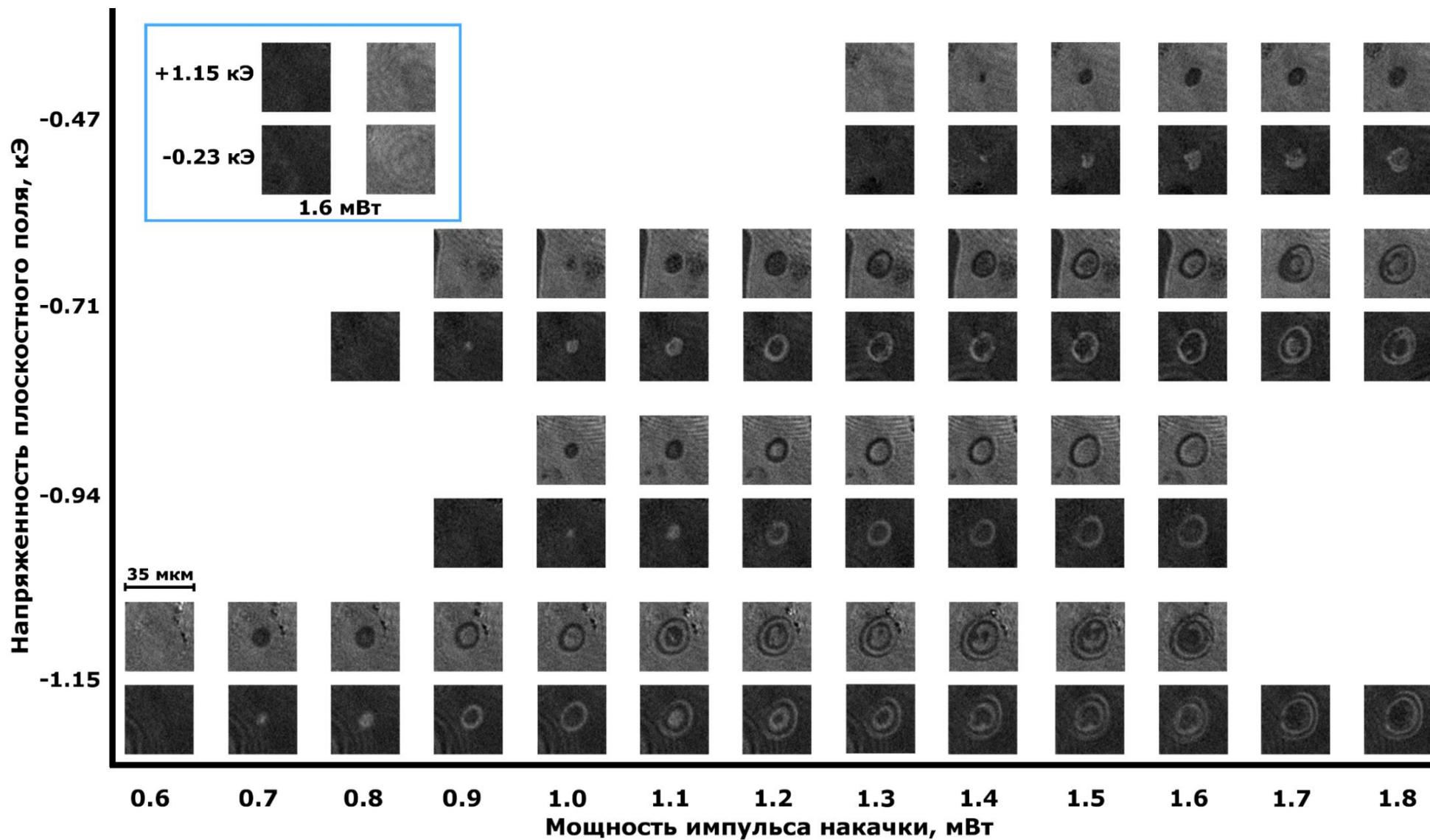


Рисунок 16. Карта-схема структуры области, перематничиваемой импульсом накачки

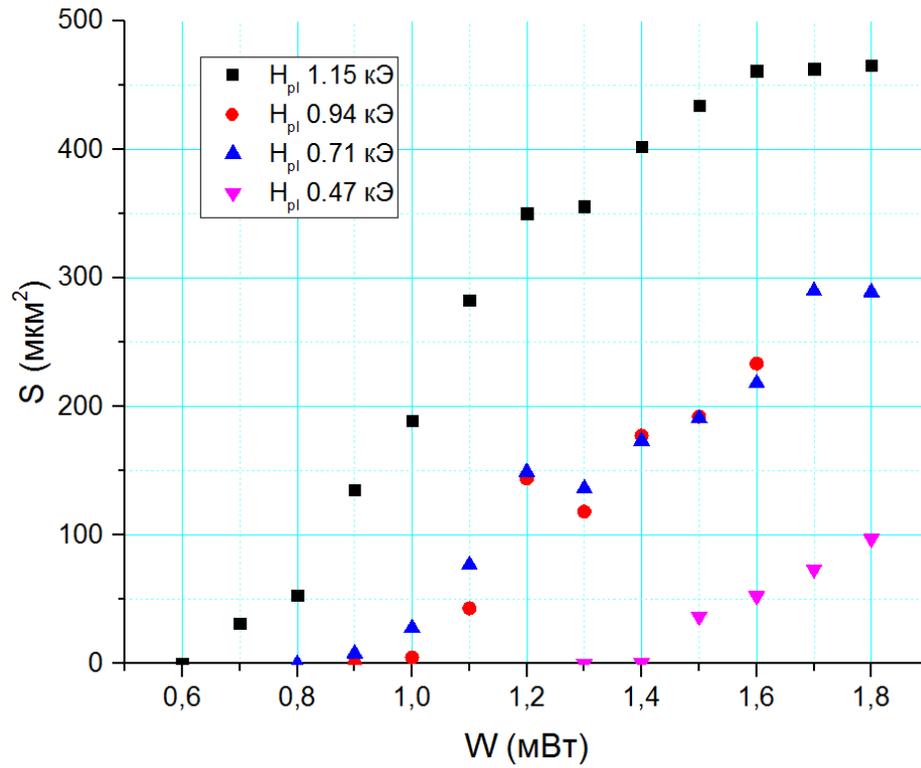


Рисунок 17. Зависимость площади  $S$  перемагниченной области от мощности  $W$  импульса накачки для разных плоскостных полей  $H_{pl}$ .

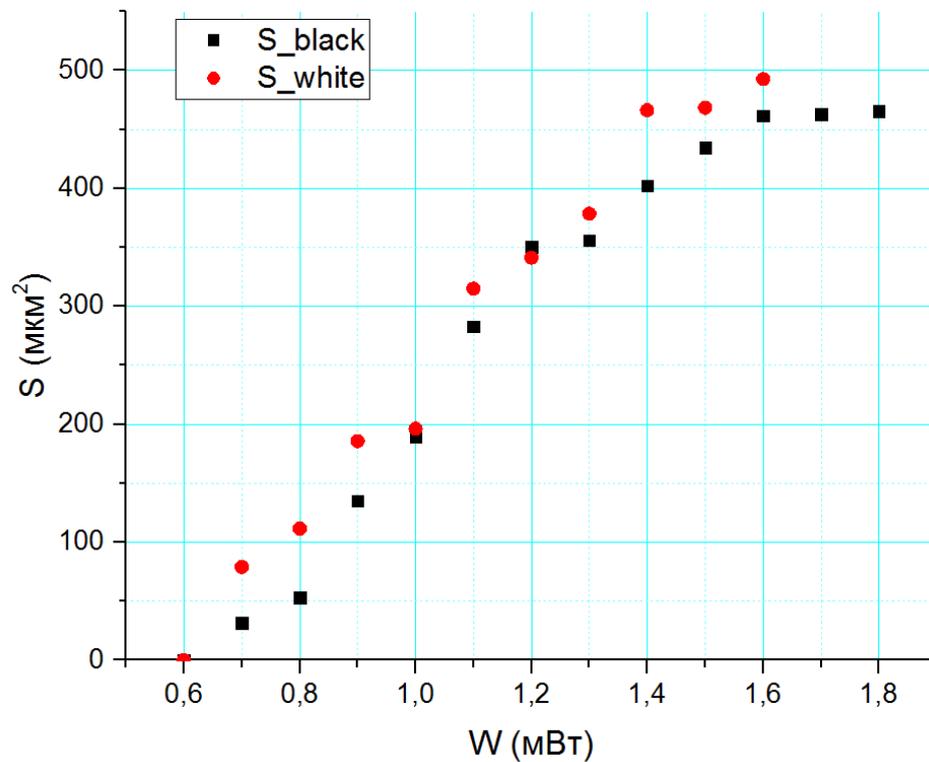


Рисунок 18. Зависимость площади  $S$  перемагниченной области от мощности  $W$  импульса накачки для фиксированного значения плоскостного поля  $H_{pl} = 1.15$  кЭ.

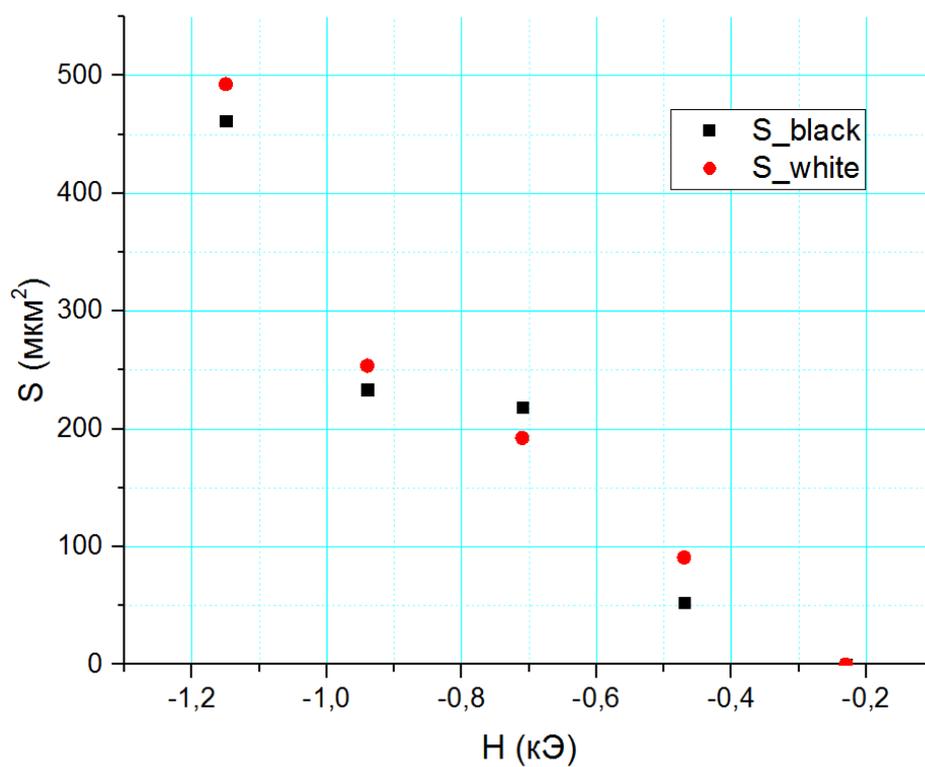


Рисунок 19. Зависимость площади  $S$  перемагниченной области от величины плоскостного поля  $H_{pl}$  для фиксированного значения мощности импульса накачки  $W_{pump} = 1.6$  мВт.

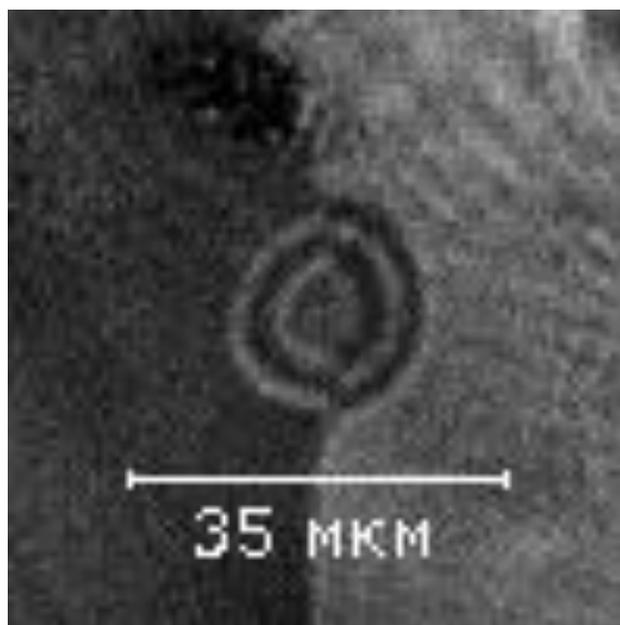


Рисунок 20. Кольцевая доменная структура перемагниченной области при фокусировке импульса накачки непосредственно на статическую ДГ ( $H_{pl}=0.71$ кЭ,  $W_{pump} = 1.6$  мВт).

Влияние плоскостного поля и мощности импульса накачки на размер перемагниченной области может быть связано с локальным нарушением анизотропии, вызываемым одновременно и присутствием плоскостного магнитного поля и импульса накачки.

В исследуемом образце наблюдается перпендикулярная анизотропия (поле анизотропии порядка 5 кЭ). Присутствие плоскостного поля, сравнимого по величине с полем анизотропии, вызывает небольшое отклонение намагниченности от ориентации вдоль нормали к поверхности пленки, не влияющее на эффект Фарадея и, тем более, не может привести к перемагничиванию. (рис. 21a) Под действием импульса накачки происходит локальный нагрев образца, анизотропия уменьшается, что приводит к изменению направления эффективного поля и вызывает прецессию намагниченности относительно этого нового направления (рис. 21b), что и приводит, в конце концов, к перемагничиванию (рис.21c). Исследования времени перемагничивания были проведены в работах [17, 18].

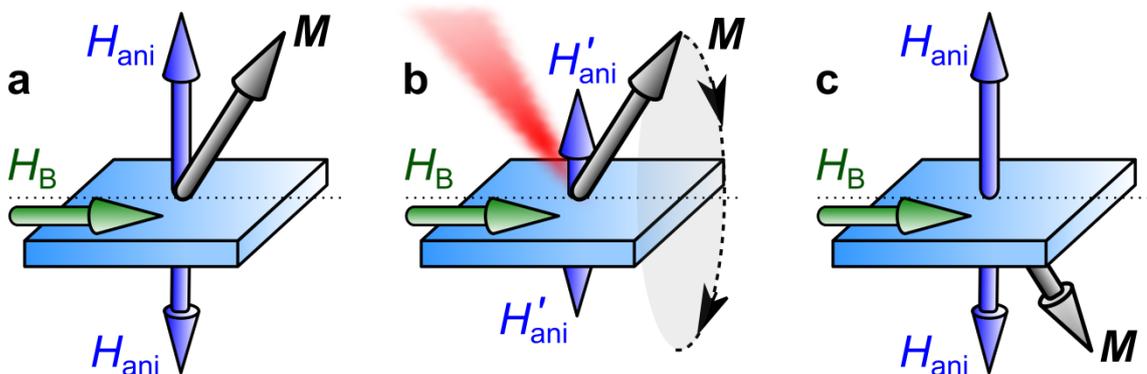


Рисунок 21. Схема механизма перемагничивания пленки ФГ в присутствии плоскостного магнитного поля и импульса накачки.

## Заключение

В работе представлены экспериментальные результаты по исследованию динамики доменных границ в пленке феррита-граната с помощью нового метода, который объединил метод двукратной высокоскоростной фотографии и метод накачки-зондирования. Положение единственной доменной границы фиксировали с помощью градиентного магнитного поля, имеющего две компоненты, одна из которых лежит в плоскости образца перпендикулярно плоскости доменной границы, а другая ориентирована вдоль его нормали. Для увеличения скорости движения доменной границы использовали дополнительное постоянное магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости доменной границы в плоскости образца. Для продвижения доменной границы использовали импульсное магнитное поле. После воздействия на доменную границу, движущуюся с некоторой скоростью, импульса накачки наблюдали локальное изменение ее скорости. Характер этого изменения зависел от взаимного расположения импульса накачки и динамической доменной границы. Было установлено, что влияние импульса накачки не зависит от поляризации возбуждающего импульса, что свидетельствует о тепловом характере явления.

Кроме того, в отсутствие импульсного магнитного поля было исследовано одновременное воздействие на образец импульса накачки и постоянного плоскостного магнитного поля. Было установлено, что такое воздействие может приводить к локальному перемагничиванию. Такое перемагничивание является результатом локального уменьшения анизотропии. Размер перемагниченной области зависит от мощности импульса накачки и величины плоскостного поля и не зависит от исходной ориентации намагниченности в домене.

## **Выводы**

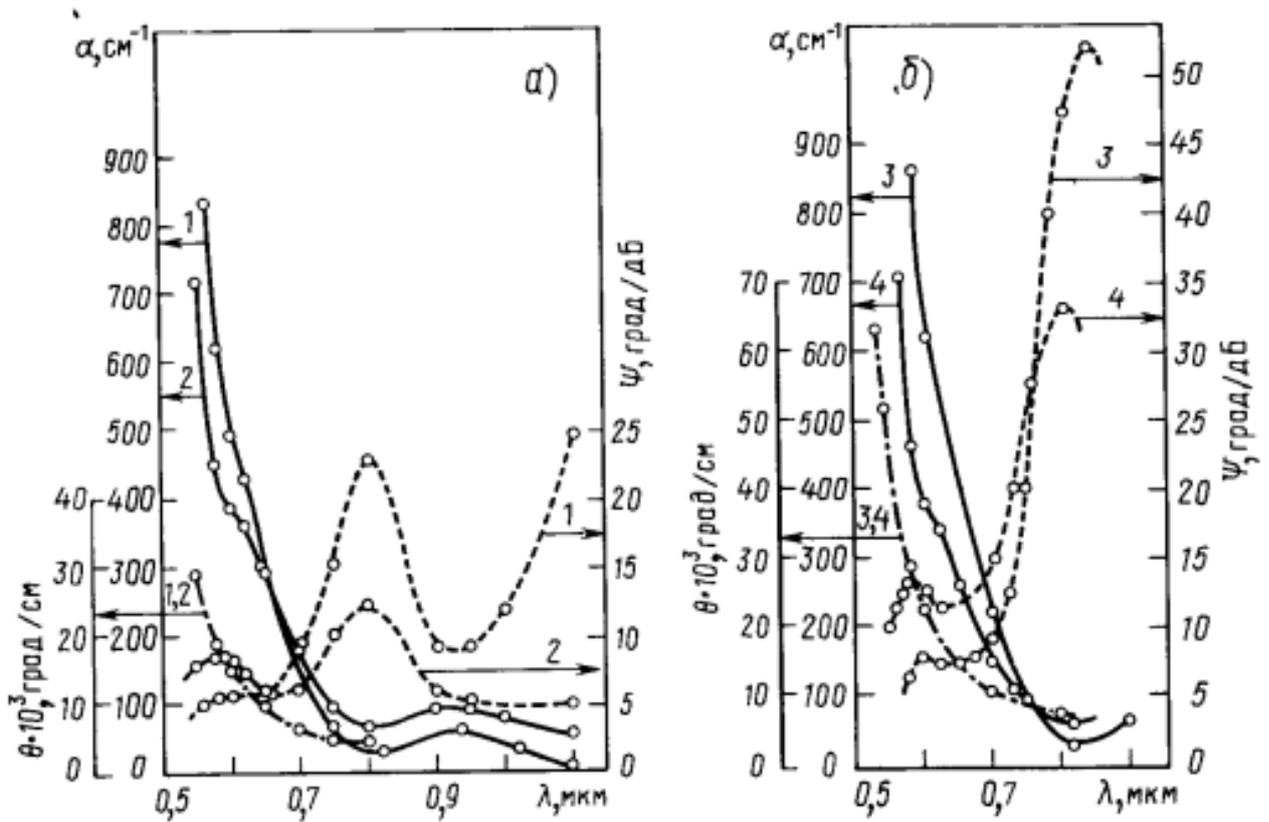
1. Динамика доменных границ в пленке феррита-граната впервые была исследована с помощью метода, объединившего метод накачки-зондирования и метод двукратной высокоскоростной фотографии. Было обнаружено изменение скорости движения доменной границы после действия на нее импульса накачки, мощность которого превышала некоторую критическую величину.
2. Динамическая доменная граница после действия на нее мощного импульса накачки могла испытывать торможение или ускорение. Различный характер воздействия связан с взаимным расположением динамической доменной границы и импульса накачки.
3. Под действием импульса накачки в присутствии плоскостного магнитного поля происходит локальное нарушение анизотропии, что создает благоприятные условия для перемагничивания. Размер и структура перемагниченной области зависят от мощности импульса накачки и величины плоскостного магнитного поля.

## Список использованной литературы.

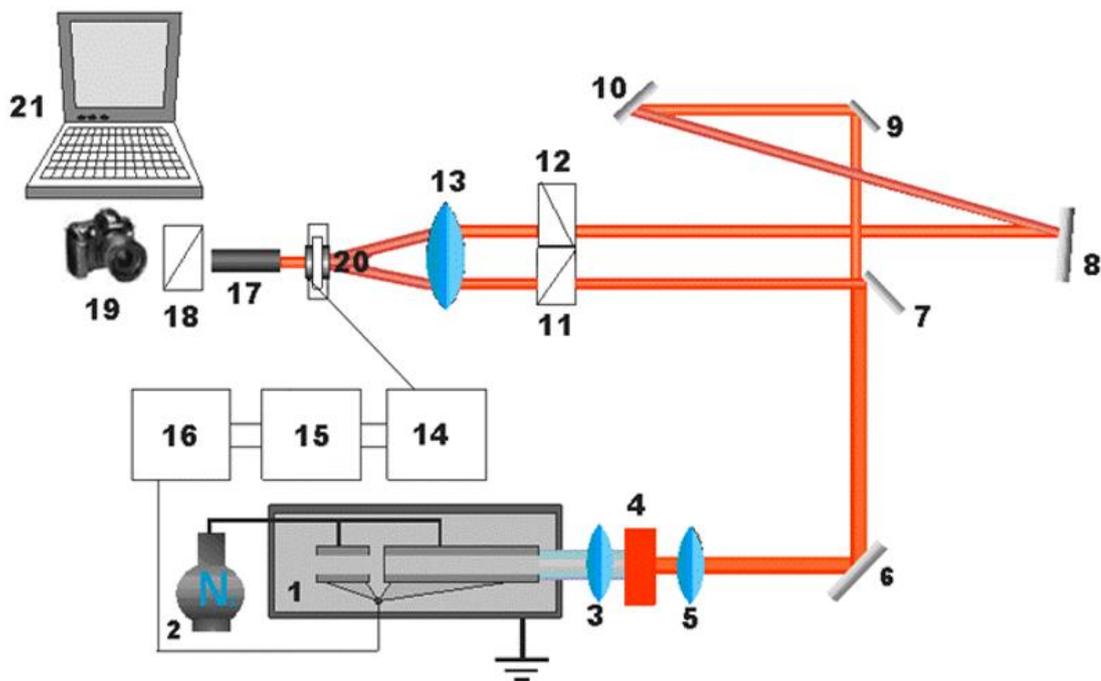
1. Th. R Albrecht, et. al., IEEE Trans. Magn 51, 0800342. (2015).
2. М.В. Четкин. et. al. ЖЭТФ, т. 86, 1411. (1984).
3. E. Beaurepaire, et. al. Phys. Rev. Lett., 76, 4250. (1996).
4. А.И. Чернов, М.А. Кожаев, et al. ФТТ 58, № 6. с. 1093. (2016).
5. В.А. Боков, В.В. Волков. ФТТ 50, 193 (2008).
6. Y. Kajiwara et al., Nature 464, 262 (2010).
7. А.К. Звездин, В.А.Котов. Магнитооптика тонких пленок. Наука. (1988).
8. В.В. Рандошкин, А.Я.Червоненкис. Прикладная магнитооптика. М.: Энергоатомиздат. (1990).
9. М.В. Четкин, И.В Парыгина, Л.Л. Савченко ЖЭТФ 110, №5(11). 1873. (1996).
- 10.В.Г. Барьяхтар, Б.А. Иванов, М.В. Четкин. Динамика доменных границ в слабых ферромагнетиках. УФН 146, с.417-458. (1985).
- 11.Л.П. Иванов, А.С. Логгинов, Г.А. Непокойчицкий. ЖЭТФ. т.84, 1006 (1983).
- 12.А.М. Калашникова, А.В. Кимель, Р.В. Писарев. УФН 185, №10. 1064. (2015).
- 13.<https://courses.physics.ucsd.edu/2014/Fall/physics211a/specialtopic/pumpprobe2.pdf>
- 14.М.А. Кожаев, А.И. Чернов, et al. Письма в ЖЭТФ 104, №12, 851. (2016).
- 15.М.В.Четкин, Ю.Н.Курбатова, Т.Б.Шапаева. ФТТ, **52**, 9, 1795 (2010).
16. Р.М.Вахитов, О.Г.Ряхова. ЖТФ **75**, 8, 59 (2005).
17. Prabhakara K.H., Zvezdin K.A., Shapaeva T.B., et al. Spatial and temporal dynamics of the laser-induced magnetization reversal in  $Y_3Fe_5O_{12}$ . Book of Abstracts MISM – 2017. Moscow, Russia, 1 – 5 July, 2017, p. 748
18. К. Н. Prabhakara, Т. В. Shapaeva, S. Wang, et al. Exploring the influence of femtosecond laser pulses on the motion of domain walls. Book of Abstracts "Ultrafast Magnetism Conference". October 9-13, 2017. Kaiserslautern, Germany. Tue-7

## ПРИЛОЖЕНИЯ

**Приложение 1.** Спектры поглощения  $\alpha$ , удельного фарадеевского вращения  $\theta_f$  и магнитооптической добротности  $\Psi$  для МПФГ составов  $\text{Lu}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}$  (а) и  $\text{Lu}_{1.5}\text{Bi}_{1.5}\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}$  (б), содержащих (1,3) и не содержащих (2, 4) свинец [7].



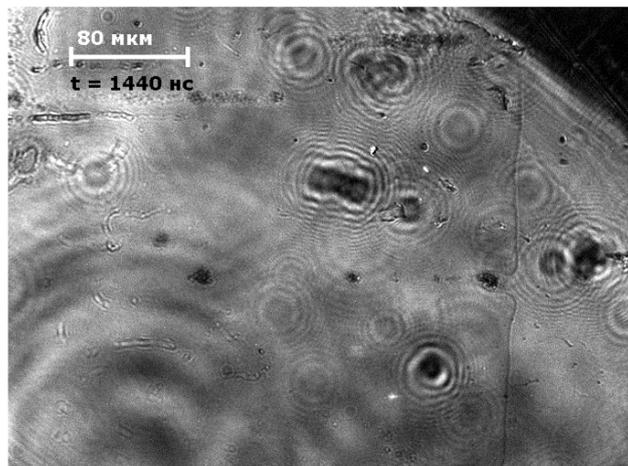
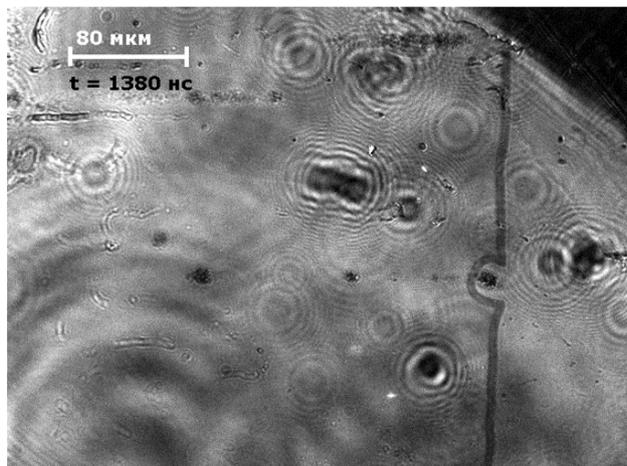
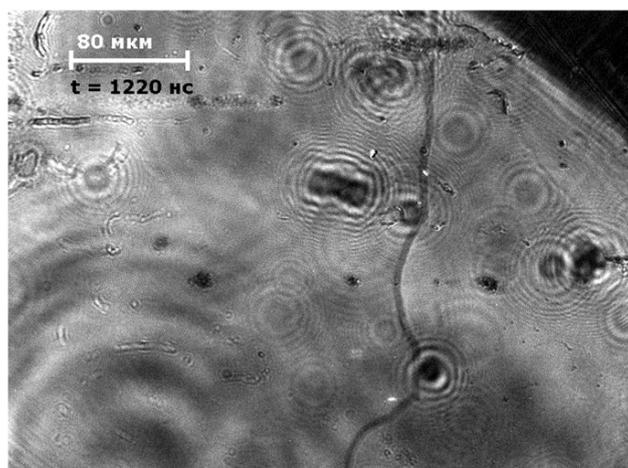
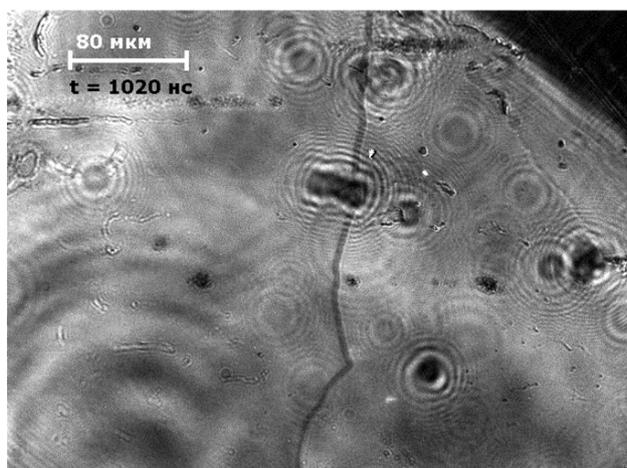
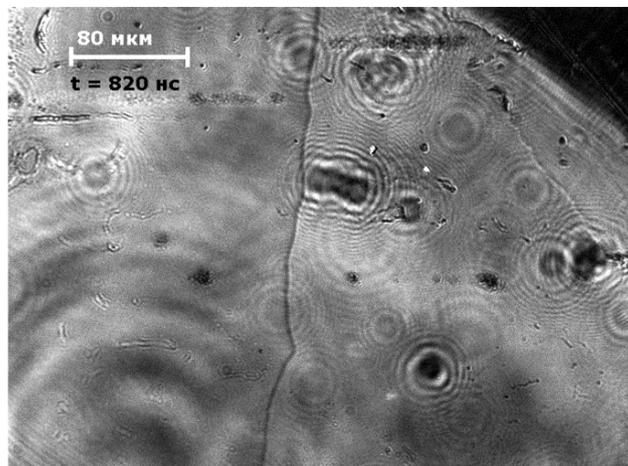
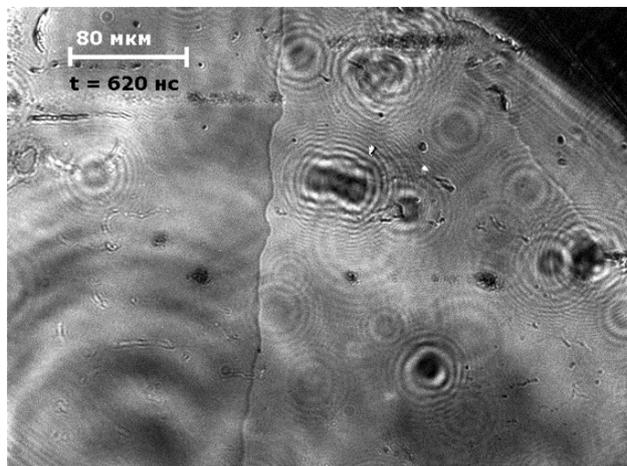
**Приложение 2.** Схема установки для исследования динамики доменных границ методом двукратной фотографии на основе эффекта Фарадея.



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 – исследуемый образец; 21 – компьютер.

**Приложение 3.** Серия двукратных фотографий динамической доменной границы. Фотографии сделаны для разных времен задержки между импульсом поля и импульсом света. Доменная граница движется слева направо.

$H_{imp} = 0.9$  кЭ,  $H_{pl} = 0.7$  кЭ,  $t = \Delta T_{field}$



#### **Приложение 4. Методика обработки фотографий.**

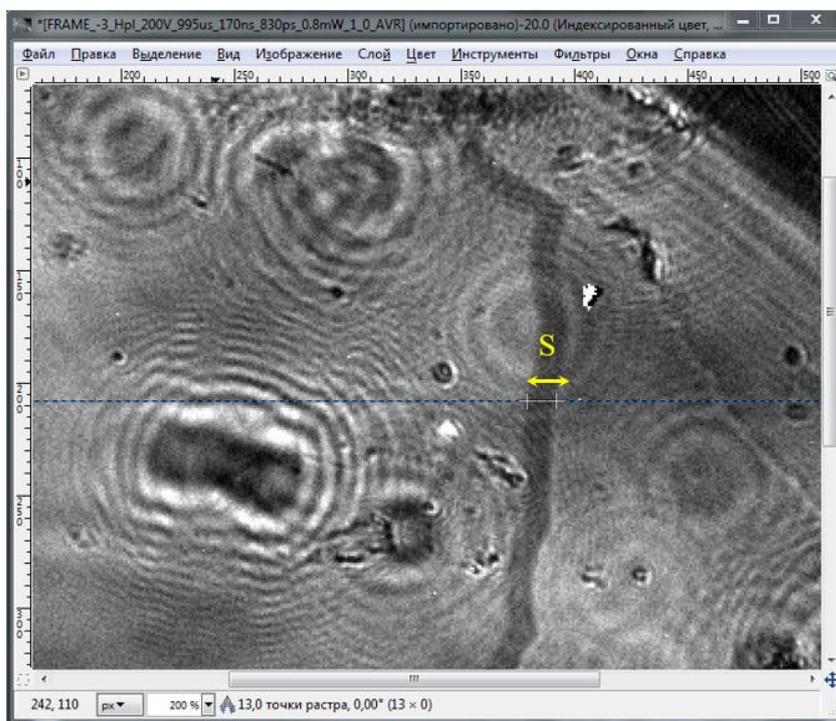
В ходе работы было обработано около 2000 фотографий, полученных в контрасте доменов. Фотографии обрабатывали в программе GIMP 2.8.22 при помощи двух инструментов «Измеритель» и «Выделение смежных областей» с подключением стыкуемого диалога «Гистограмма». GIMP – GNU Image Manipulation Program или GIMP («Гимп») – свободно распространяемый растровый графический редактор, программа для создания и обработки растровой графики и частичной поддержкой работы с векторной графикой.

«Измеритель» позволяет узнавать расстояния между точками активного изображения и определять угол и количество пикселей между точкой нажатия и текущей позицией указателя мыши. Эта информация отображается в строке состояния и окне информации. Таким образом, измеритель позволяет узнать ширину контрастной полосы, что дает возможность решить задачу определения скорости ДГ (Приложение 5) или периода кольцевой структуры.

Инструмент «Выделение смежных областей (Волшебная палочка)» выделяет области активного слоя или изображения по признаку схожести цветов. Для решения поставленной задачи этот инструмент использовали в связке со стыкуемым диалогом «Гистограмма», одной из функций которого является предоставление информации о количестве выделенных пикселей. Таким образом, эта связка позволяет получить информацию о площади перемагниченной области, так как она, согласно схеме эксперимента, имеет противоположный окружающему домену контраст (Приложение 6).

Последующая обработка данных, полученных указанными выше методами, производилась при помощи стандартного приложения пакета Office MS Excel 2016 и проприетарного программного обеспечения Origin 2015 фирмы OriginLab Corporation для численного анализа данных и научной графики.

**Приложение 5.** Использование программы GIMP для определения скорости динамической ДГ методом двукратной высокоскоростной фотографии.



696px = 430 мкм  
 Разрешение: 0.62 мкм/px  
 $t_2 - t_1 = 16$  нс

$$V = \frac{S}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{13 \cdot 0.62 \text{ мкм}}{16 \text{ нс}} \cdot 10^3$$

$$V \approx 501.9 \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

**Приложение 6.** Использование программы GIMP для определения площади области, перемагниченной импульсом накачки.

