

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

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**ЗАДАЧА**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЛИ  
ГИСТЕРЕЗИСА ПО АНАЛИЗУ ФОТОГРАФИЙ  
ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПЛЕНКИ ФЕРРИТА–ГРАНАТА  
ПРИ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИИ**

**СПЕЦПРАКТИКУМ КАФЕДРЫ МАГНЕТИЗМА**

**МОСКВА 2017**

Составители: Шапаева Т.Б.,  
Курбатова Ю.Н.,  
Шапаев Б.А.

## **Определение кривой намагничивания и петли гистерезиса по анализу фотографий доменной структуры пленки феррита-граната при перемагничивании.**

Цель задачи состоит в получении локальной кривой намагничивания и петли гистерезиса с помощью анализа доменной структуры пленки феррита-граната в процессе перемагничивания, а также получение зависимости периода доменной структуры и размера отдельного домена от величины приложенного магнитного поля, ориентированного перпендикулярно поверхности пленки.

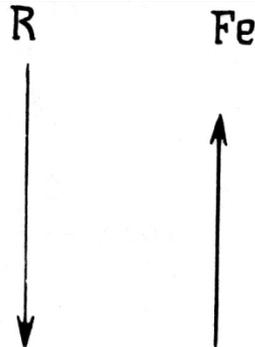
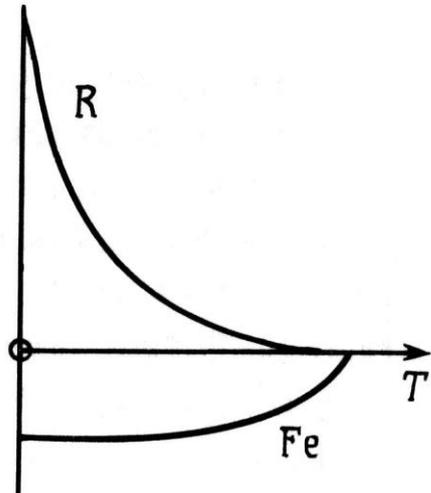
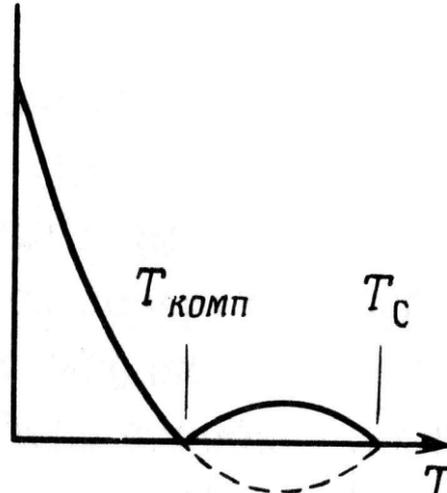
### **1. Пленки ферритов-гранатов.**

Ферриты-гранаты – магнитные диэлектрики с уникальными свойствами. Прозрачность и высокое удельное фарадеевское вращение в видимой области спектра делает эти материалы очень удобными для магнитооптических исследований и демонстраций.

Ферриты-гранаты имеют общую формулу  $R_3Fe_5O_{12}$ , где R – трехвалентный ион редкоземельного металла (Y, Cd, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Yb, Sm, Eu, Tb). Кристаллическая структура изоморфна структуре минерала граната. 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.

Получение ферритов-гранатов в виде эпитаксиальных пленок дает уникальную возможность варьирования химического состава и, как следствие, возможность менять свойства материала в широком диапазоне. В частности, размер доменов в зависимости от состава пленки может меняться от  $10^{-7}$  до  $10^{-3}$  м, намагниченность насыщения может меняться более чем на два порядка, а константа одноосной анизотропии – на восемь порядков. Пленки ферритов-гранатов – диэлектрики, которые являются ферримагнетиками. В общем случае в этих материалах принято выделять

две магнитных подрешетки, одна из которых относится к редкоземельным элементам, а другая – к железу (рис.1). Намагниченности подрешеток по-разному зависят от температуры (рис.2), поэтому зависимость суммарной намагниченности от температуры, схематично показанная на рис.3, имеет температуру компенсации. Величина температуры компенсации сильно зависит от состава пленки (рис.4). Указанием на то, что редкоземельные ионы достаточно слабо влияют на магнитные свойства ферритов-гранатов, является тот факт, что температура Нееля в этих материалах практически не зависит от входящих в них редкоземельных ионов и составляет  $563 \pm 15$  К (рис. 4).

	<p>Рис.1. Схематическое изображение намагниченностей подрешеток железа (Fe) и редкоземельных элементов (R).</p>
	
<p>Рис.2. Схематическое изображение температурной зависимости намагниченностей подрешеток железа и редкоземельных элементов</p>	<p>Рис.3. Схематическое изображение температурной зависимости суммарной намагниченности подрешеток</p>

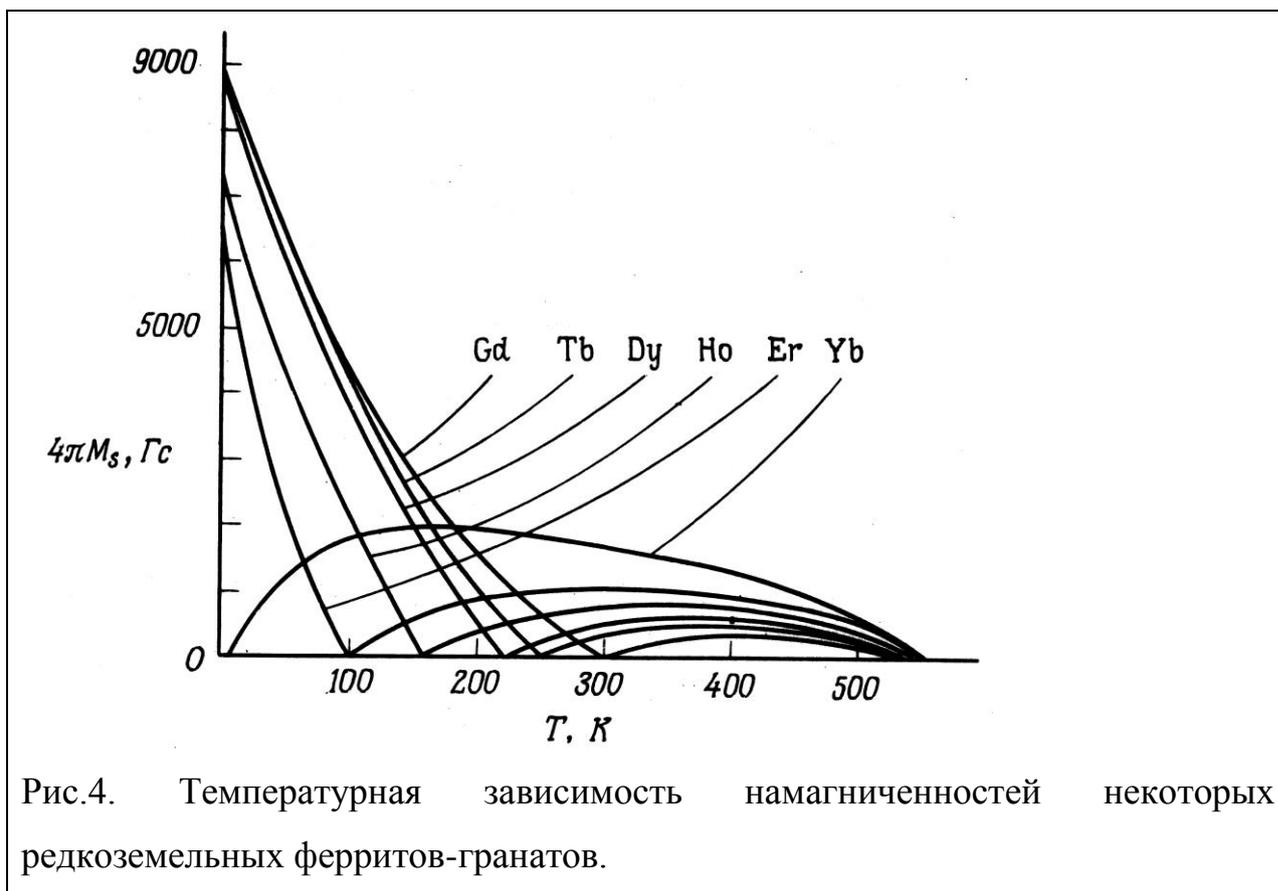


Рис.4. Температурная зависимость намагниченностей некоторых редкоземельных ферритов-гранатов.

Пленки ферритов-гранатов выращиваются на прозрачной подложке, ориентация кристаллографических осей которой определяет кристаллографическую ориентацию самой пленки. В настоящей задаче будут использованы пленки с ориентацией оси (111) перпендикулярно плоскости пленки. В таких пленках наблюдается лабиринтная доменная структура. Период кристаллической структуры подложки должен быть максимально близок к аналогичному параметру пленки. Толщина пленки составляет порядка нескольких мкм, при этом толщина подложки примерно на два порядка больше.

Для наблюдения доменной структуры с помощью эффекта Фарадея материал должен быть прозрачным и обладать достаточно большим удельным фарадеевским вращением. Для магнитооптических исследований обычно используют пленки ферритов-гранатов, содержащие висмут. Этот элемент, с одной стороны, увеличивает удельное

фарадеевское вращение (рис.5), но, с другой, его большая концентрация приводит к уменьшению прозрачности (рис.6).

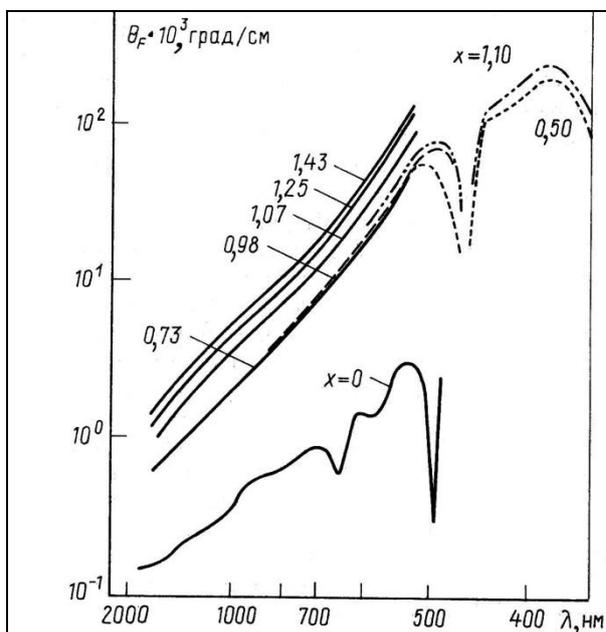


Рис.5. Спектры удельного фарадеевского вращения системы  $R_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$  с различным содержанием висмута.

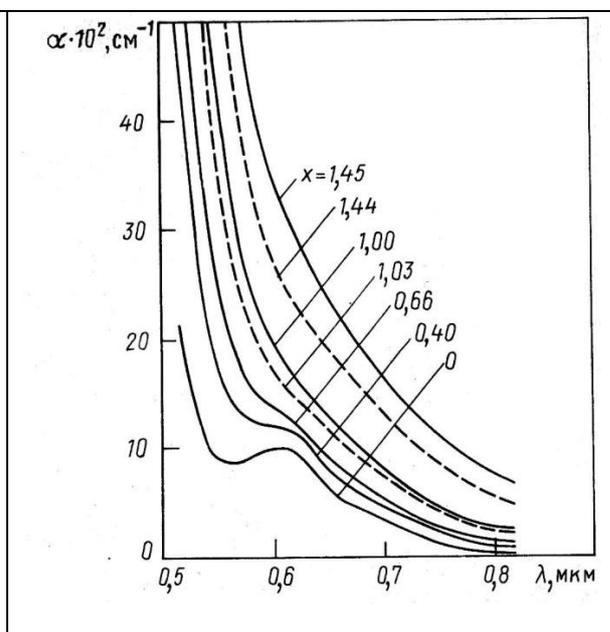


Рис. 6. Спектры поглощения системы  $Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$  с различным содержанием висмута.  $I = I_0 e^{-\alpha \cdot z}$ ,  $I$  — интенсивность падающего и прошедшего света

## 2. Эффект Фарадея.

В 1845 г. М. Фарадей обнаружил, что если поместить в постоянное магнитное поле стекло, то оно станет оптически активным. Это значит, что если через него пропустить в направлении поля линейно поляризованную волну, то плоскость поляризации волны повернется на некоторый угол, зависящий от размеров и свойств материала, а также от напряженности внешнего магнитного поля. Позже выяснилось, что то же самое будет справедливо для вещества, обладающего спонтанной намагниченностью,

если электромагнитная волна будет распространяться вдоль направления намагниченности.

*Эффект Фарадея*, или *эффект кругового магнитного двулучепреломления* – один из магнитооптических эффектов, состоит в повороте плоскости поляризации линейно поляризованной электромагнитной волны при ее прохождении через продольно намагниченную среду (рис.7).

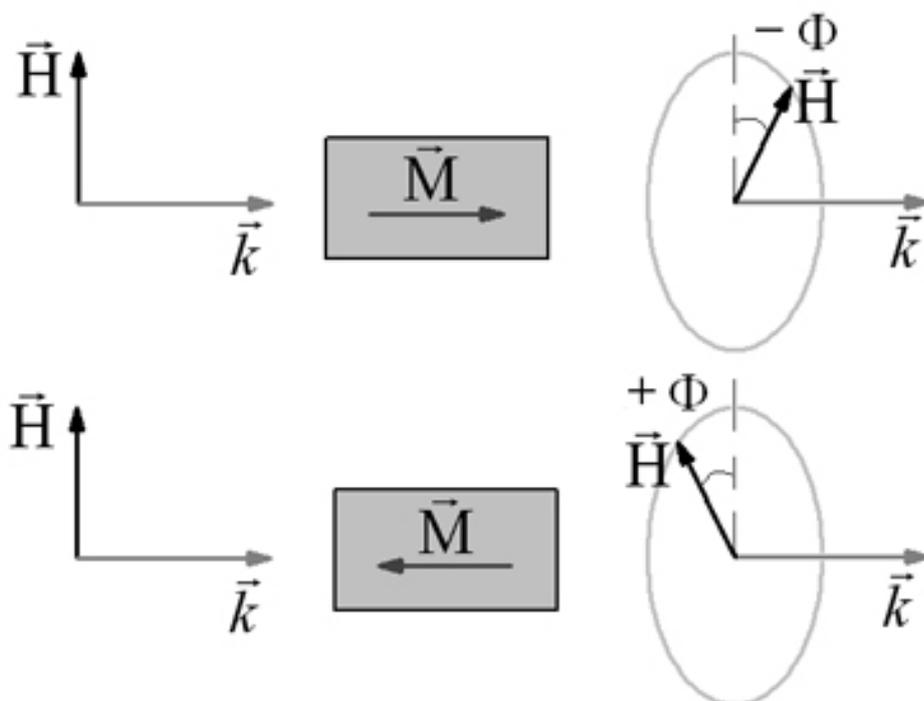


Рис. 7. Эффект Фарадея.

Для объяснения эффекта линейно поляризованную волну можно представить в виде суммы двух волн, поляризованных по правому и левому кругу. Вращение плоскости поляризации является следствием различия показателей преломления  $n_+$  и  $n_-$  для право- и лево- циркулярно поляризованных электромагнитных волн при их распространении в намагниченной среде. Вследствие этого волны, поляризованные по правому и левому кругу, распространяются в веществе с разными фазовыми скоростями. При прохождении в веществе некоторого

расстояния  $l$  между ними появляется разность фаз, а плоскость поляризации результирующей линейно поляризованной волны поворачивается на угол

$$\Phi = \frac{\omega}{c}(n_+ - n_-)l \quad (1)$$

где  $\omega$  — частота электромагнитной волны,  $c$  — скорость света,  $l$  — толщина образца.

Величина эффекта Фарадея линейно зависит от намагниченности образца, поэтому поворот плоскости поляризации линейно поляризованной электромагнитной волны при неизменном направлении ее распространения и изменении направления намагниченности на обратное меняет знак (рис.7).

### **3. Наблюдение доменной структуры пленки феррита-граната с помощью магнитооптического эффекта Фарадея**

В отсутствие внешних магнитных полей при охлаждении ферромагнетика ниже температуры Кюри в нем может образоваться определенная конфигурация областей самопроизвольной намагниченности (доменов), называемая доменной структурой. При этом суммарная намагниченность образца, как правило, равна нулю, что приводит к минимизации магнитостатической энергии образца. Каждый домен намагничен до насыщения. Вектор намагниченности в каждом домене ориентирован вдоль определенного направления, называемого осью легкого намагничивания (ОЛН). Ход кривой намагничивания, т.е. зависимость намагниченности образца от внешнего магнитного поля  $M(H)$ , определяется процессами возникновения, формирования и исчезновения доменов.

При комнатной температуре в пленке феррита-граната, выращенной на подложке с ориентацией [111], реализуется лабиринтная доменная

структура (рис. 8). Направление намагниченности в доменах схематично показано на рис. 9 и 10.



При прохождении линейно поляризованного света через домены с противоположной намагниченностью плоскость поляризации поворачивается в противоположные стороны на равные углы (красный и зеленый отрезки на рис.11). Главная ось анализатора выставляется перпендикулярно направлению поляризации света, прошедшего через один из доменов (рис.11). При такой геометрии свет через этот домен не пройдет, и мы будем видеть его черным (рис.12). Свет через другой домен пройдет частично, этот домен будет светлее (рис.12). Такое изображение соответствует контрасту доменов.

Если главные оси поляризатора и анализатора параллельны или скрещены (рис. 13), то интенсивность света, прошедшего через домены с разной намагниченностью одинакова: оба домена или светлые, или темные, видна только граница между ними (рис. 14). Такой контраст называется «контрастом доменных границ». Он обычно используется для

исследования динамики процессов перемагничивания, когда важно знать зависит ли ширина доменной границы от скорости ее движения.

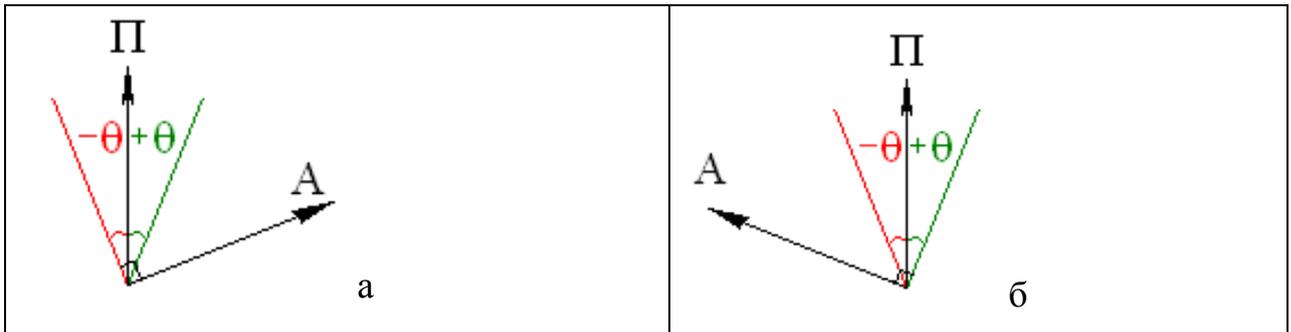


Рис.11 Варианты взаимного расположения главных осей поляризатора и анализатора и поворот плоскости поляризации света, прошедшего через домены с противоположной намагниченностью (контраст доменов).

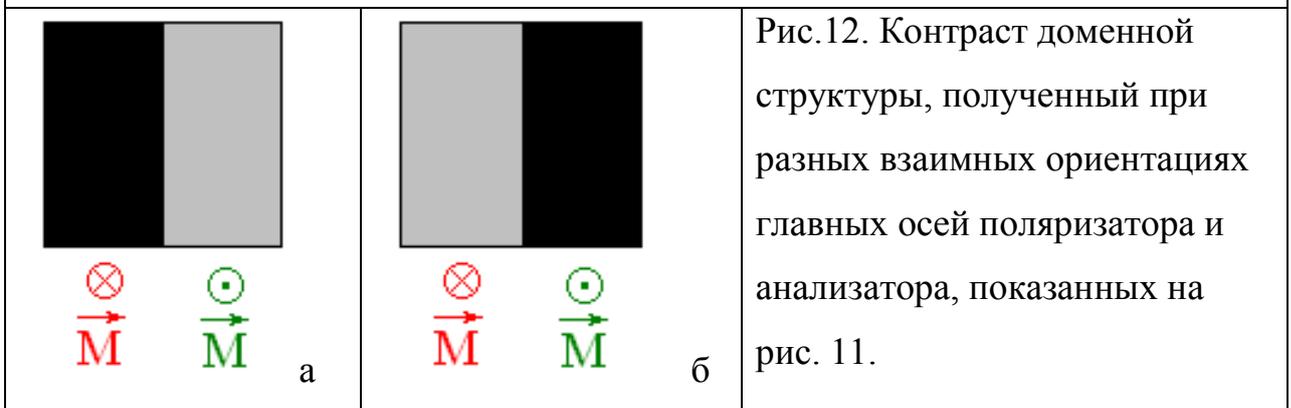


Рис.12. Контраст доменной структуры, полученный при разных взаимных ориентациях главных осей поляризатора и анализатора, показанных на рис. 11.

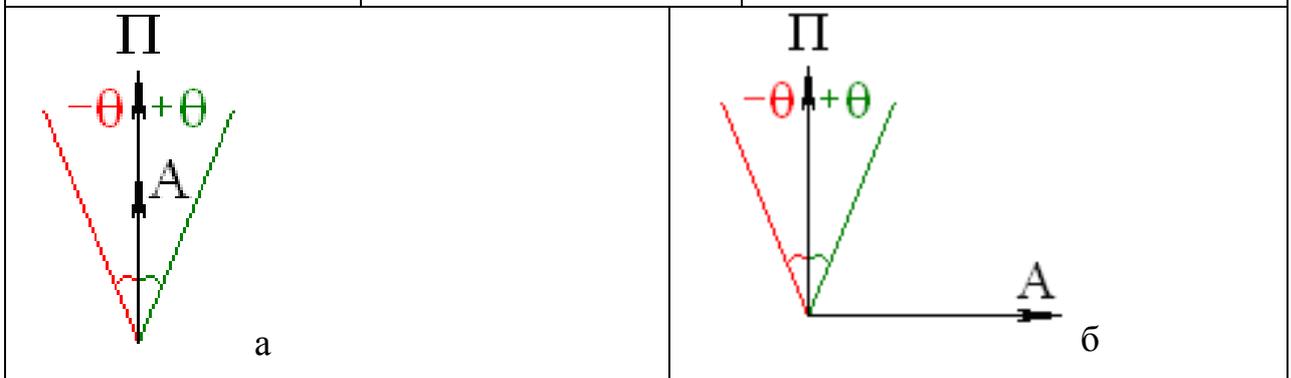


Рис.13 Варианты взаимного расположения главных осей поляризатора и анализатора и поворот плоскости поляризации света, прошедшего через домены с противоположной намагниченностью (контраст доменных границ).



#### 4. Экспериментальная часть.

Доменную структуру пленки феррита-граната будем наблюдать с помощью эффекта Фарадея, используя поляризационный микроскоп (рис.15). Намагничивать образец будем с помощью катушек Гельмгольца, используя камеру для микросъемки, будем фотографировать доменную структуру при перемагничивании.

#### Порядок работы.

1. Включить микроскоп, получить сфокусированное изображение доменной структуры пленки феррита-граната в контрасте доменов.
2. Вращая поляризатор получить изображение доменной структуры в контрасте доменов с противоположными контрастами и изображение доменной структуры в контрасте доменных границ.
3. Получив контрастное изображение доменной структуры в контрасте доменов, заменить окуляр микроскопа камерой для микросъемки.
4. Включить компьютер, на рабочем столе создать папку для хранения фотографий и скопировать в нее файл «сетка.jpg». Это фотография градуировочной сетки (ширина темной полосы 10 мкм, а расстояние между такими полосами 100 мкм).
5. Войти в программу «TourCam», перевести ее в режим получения черно-белых фотографий.

6. Изменяя величину тока от 0 до 190 мА с шагом 10 мА, фотографировать доменную структуру, вводя обозначения изображений по схеме: «1-10мА.png», где «1» – номер фрагмента кривой намагничивания и петли гистерезиса (рис. 16), «10 мА» – величина тока через намагничивающие катушки.

Сохранить полученные фотографии в созданной ранее папке.

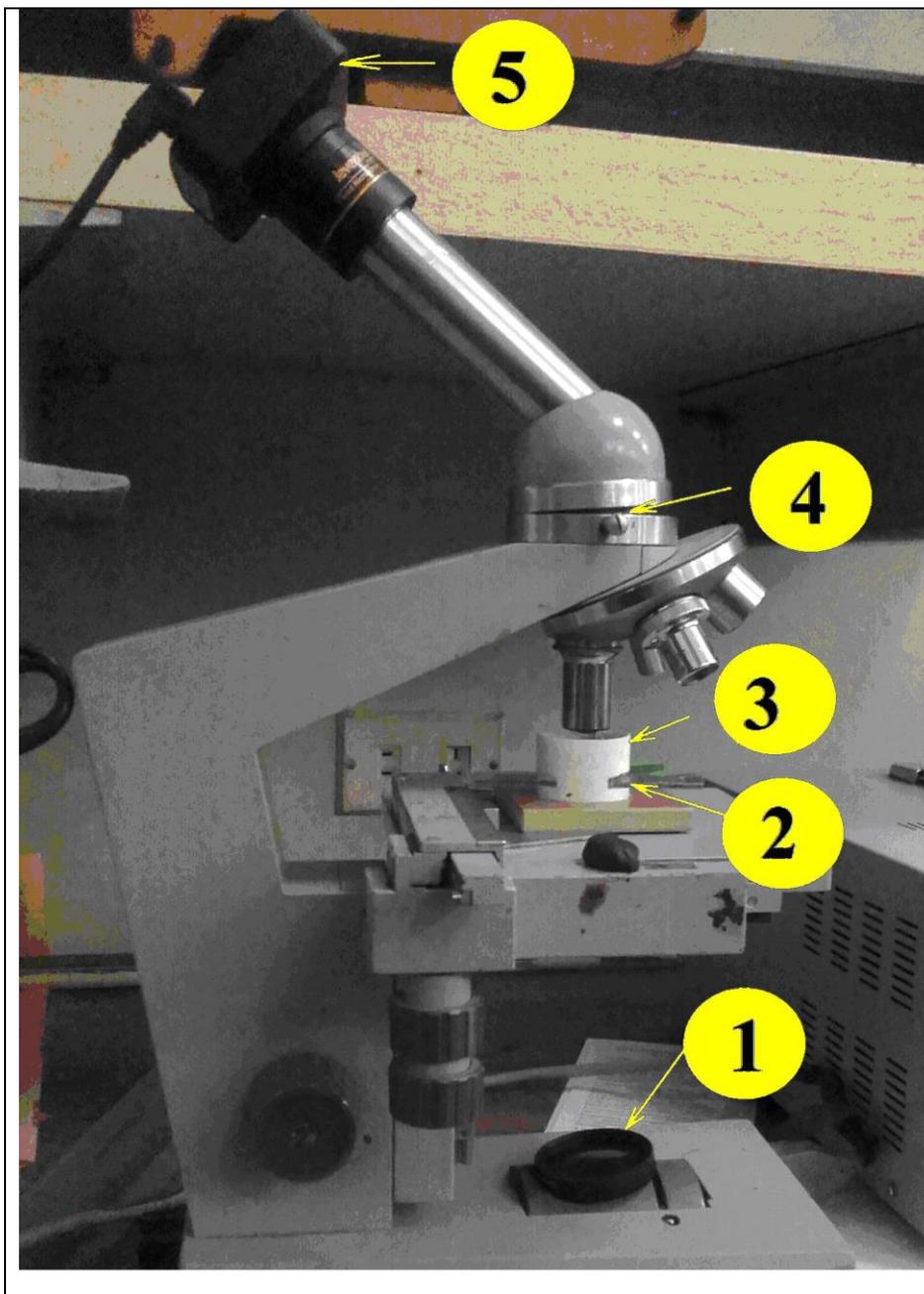
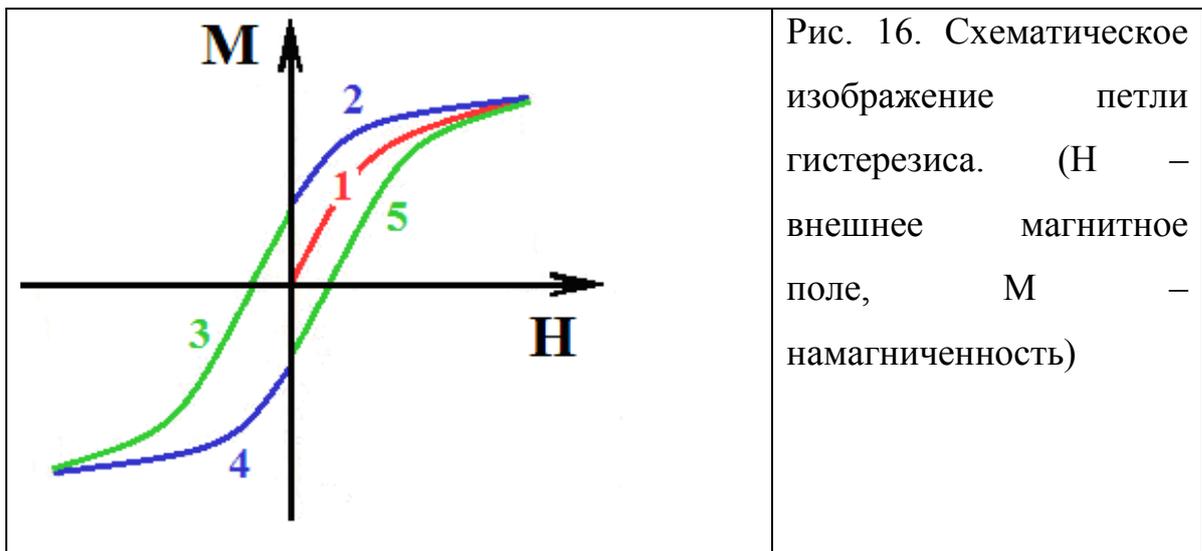


Рис.15. Оптическая часть установки: микроскоп.

1 – поляризатор,  
2 – стекло, на котором находится образец,  
3 – намагничивающие катушки,  
4 – анализатор,  
5 – камера для микросъемки.



Для получения зависимости периода доменной структуры ( $d$ ) и ширины отдельного домена ( $x$ ) от величины магнитного поля ( $H$ ) нужно провести измерения с помощью программы Adobe Photoshop. На всех фотографиях, соответствующих кривой намагничивания (участок 1 на рис.16), нужно сделать не менее 5 измерений каждой величины. Используя градуировочную сетку, получить значения периода доменной структуры и ширины отдельного домена в мкм, оценить погрешность измерений. Построить зависимости  $d(H)$  и  $x(H)$ . Постоянная катушки 312 Э/А

Для получения кривой намагничивания и петли гистерезиса необходимо провести обработку фотографий, используя специальную программу. Для этого следует выполнить следующие действия:

1. на рабочем столе открыть папку «program» и скопировать в нее полученные фотографии;
2. открыть окно команд, поместив курсор на эту папку, нажать «shift», удерживая правую кнопку мыши;
3. набрать в окне команд «prog.exe 1-10мА.png», в результате будет вычислена суммарная площадь черных областей ( $S_b$ ) и разность между площадями черных и белых областей ( $S_b - S_w$ ) в относительных единицах, считая площадь всей фотографии за 1.

```
C:\windows\system32\cmd.exe
C:\Users\Admin\Desktop\program>prog.exe 1-10мА.png Файл для измерений
Black area of provided image is approximately 0.16945394 =Sb
Difference between black and white over total area = -0.66109212 =Sb-Sw
C:\Users\Admin\Desktop\program>_
```

Рис. 17. Иллюстрация работы с программой.

Намагниченность доменов в пленке феррита-граната может быть направлена только или вверх или вниз. Намагничивание происходит за счет увеличения площади одних доменов за счет других: или светлые домены расширяются за счет темных или наоборот. Следовательно, зависимость относительной намагниченности от внешнего магнитного поля – по сути это зависимость  $|S_b - S_w|$  (H).

**К отчету о задаче необходимо предоставить следующие результаты:**

1. Зависимость периода доменной структуры (d) от величины магнитного поля (H).
2. Зависимость ширины отдельного домена (x) от величины магнитного поля (H).
3. Кривую намагничивания и петлю гистерезиса.
4. Построенные на одном графике кривую намагничивания и зависимость  $d(H)$ , нормированную на максимальную ширину домена.

**Литература.**

1. Кринчик Г.С. «Физика магнитных явлений», Москва 1976 г.