538.221

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК В СПЕЦИАЛЬНОМ ФИЗИЧЕСКОМ ПРАКТИКУМЕ

Программа курса общей физики для физико-математических факультетов предусматривает знакомство студентов с физическими свойствами ферромагнетиков и магнитооптическими явлениями. До последнего времени постановка лабораторных работ с целью изучения доменной структуры ферромагнетиков и магнитооптических явлений была затруднена сложностью экспериментальной методики. Быстрое развитие за последние годы новой области ферромагнетизма — физики тонких ферромагнитных пленок, сделало возможным более глубокое и наглядное изучение свойств ферромагнетиков в вузовском курсе физики.

Нами в Иркутском педагогическом институте поставлена лабораторная работа по изучению свойств ферромагнетиков с использованием в качестве ферромагнитных образцов пермаллоевых и железных пленок, получаемых методом термического испарения в вакууме. Целью работы является ознакомление студентов на практике с вопросами общего курса физики, связанными с магнитной анизотропией, доменной структурой, процессами перемагничивания и магнитным гистерезисом ферромагнетиков [1], а также с магнитооптическими явлениями [2].

Для измерения магнитных характеристик ферромагнитных пленок в работе используется установка, отличительной особенностью которой от ранее описанных является то, что она компактна, собирается из приборов, серийно выпускаемых нашей промышленностью, и может быть собрана на базе любого поляризационного или биологического микроскопа.

В основу метода исследования положено использование магнитооптических эффектов Фарадея и Керра, заключающихся в следующем [3].

Магнитооптический эффект Фарадея. При прохождении плоскополяризованного света через намагниченную среду происходит вращение плоскости поляризации. Величина угла поворота плоскости поляризации в ферромагнетиках описывается выражением: $\varphi = kIl$, где k — постоянная Кундта, I — намагниченность среды, l — толщина слоя. Направление вращения плоскости поляризации зависит от направления вектора намагниченности.

Магнитооптический эффект Керра. При отражении плоскополяризованного света от намагниченного зеркала также происходит вращение плоскости поляризации. Величина угла поворота плоскости поляризации зависит от величины намагниченности зеркала, взаимного расположения поверхности ферромагнетика, плоскости падения света и вектора намагниченности. Угол поворота максимален, если вектор намагниченности параллелен как поверхности зеркала, так и плоскости падения света (случай так называемого меридионального эффекта Керра). Наиболее эффективный угол падения луча, при котором происходит максимальное вращение плоскости поляризации, зависит от материала зеркала. Для железного зеркала он примерно равен 60°.

Направление вращения плоскости поляризации света в обоих случаях зависит от направления вектора намагниченности. Эта особенность эффектов позволяет

применять их для выявления доменной структуры ферромагнетиков. Если ферромагнитный образец, например, тонкая ферромагнитная пленка, разбит на домены — области с противоположными направлениями намагниченности, то вращение плоскости поляризации света, отраженного (или прошедшего) от соседних доменов, будет происходить в противоположные стороны. Гашение анализатором света от доменов с одинаковым направлением намагниченности позволяет визуально наблюдать доменную структуру в виде темных и светлых областей.

Эти методы позволяют наблюдать процессы перемагничивания в динамике, а при использовании фотоумножителя — осциллографировать их.

КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки для наблюдения доменной структуры и осциллографирования петель гистерезиса тонких ферромагнитных пленок приведена на рис. 1. Общий вид установки показан на рис. 2. При использовании меридиональ-

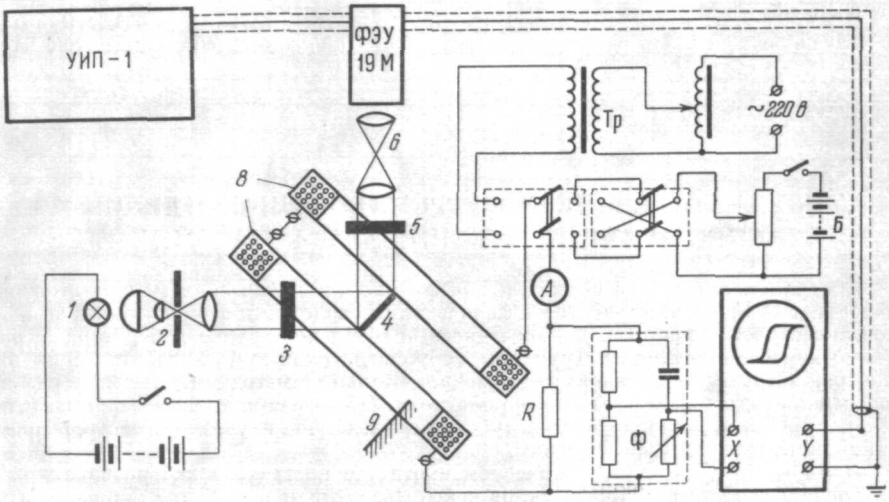

Рис. 1. Принципиальная схема установки.

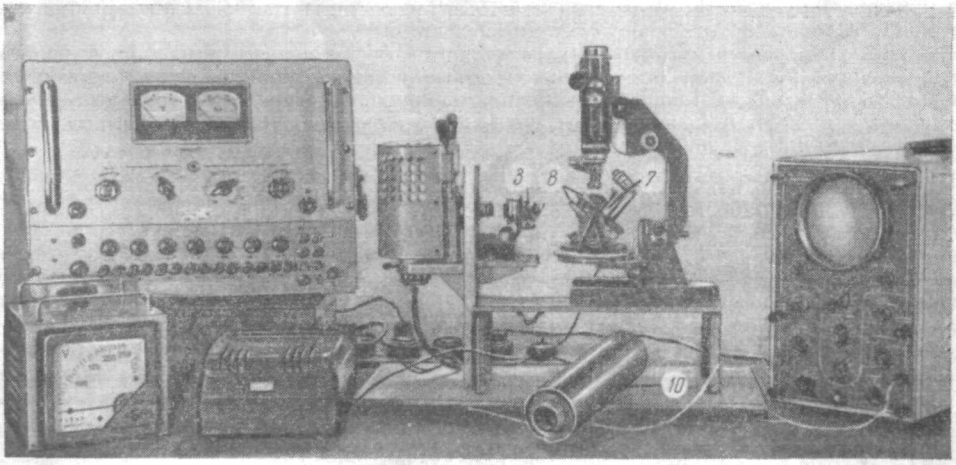

Рис. 2. Общий вид установки.

ного эффекта Керра свет от кинопроекционной лампы *1*, питаемой от батареи аккумуляторов, с помощью оптической системы *2* преобразуется в параллельный пучок,

проходит поляризатор *3* и, отражаясь от ферромагнитной пленки *4*, попадает в объектив микроскопа *6*.

Анализатор *5* желательно установить перед объективом для устранения влияния внутренних напряжений в объективе на изображение доменной структуры. Для точной ориентации пленки ее укрепляют на столике Федорова *7* (рис. 2), на котором смонтированы перемагничивающие кольца *8*, питаемые переменным током от трансформатора Тр или постоянным током от батареи Б. Кольца создают поле, параллельное плоскости пленки и плоскости падения света. При использовании эффекта Фарадея осветитель вместе с коллиматорным устройством *2* опускается вниз так, чтобы луч падал на зеркало *9*. Отражаясь от зеркала, свет проходит через пленку, анализатор и попадает в объектив микроскопа. Поляризатор в этом случае устанавливается между зеркалом и пленкой.

При осциллографировании петель гистерезиса к тубусу микроскопа крепится фотоумножитель ФЭУ-19М, заключенный в железный экран *10* (см. рис. 2) для исключения наводок от внешних магнитных полей. Питание фотоумножителя осуществляется от источника стабилизированного напряжения УИП-1, высоковольтные выходы которого соединены последовательно так, что на фотоумножитель подается регулируемое напряжение до 1000 *в*. Сигнал с фотоумножителя поступает на вертикальный вход осциллографа типа С1-1. На горизонтальный вход осциллографа сигнал снимается с безиндуктивного сопротивления R, которое включено последовательно с перемагничивающими кольцами. Для устранения сдвига фаз используется фазовращатель Ф. Перемагничивание пленки при осциллографировании петель гистерезиса производится переменным током частотой 50 *гц*.

МЕТОДИКА РАБОТЫ

В магнитном отношении пленки обычно анизотропны. Вследствие малой толщины пленки вектор намагниченности, как правило, лежит в ее плоскости. Кроме того, в плоскости пленки имеется ось легкого намагничивания, совпадающая с направлением магнитного поля, прикладываемого в процессе получения пленки. Прямая, лежащая в плоскости пленки и перпендикулярная к оси легкого намагничивания, называется осью трудного намагничивания. Для наблюдения доменной структуры пленка ориентируется так, чтобы ось легкого намагничивания была параллельна плоскости падения света. Разбиение пленки на домены осуществляется размагничиванием ее переменным магнитным полем с убывающей до нуля амплитудой. Затем анализатор и поляризатор устанавливаются на максимальное затемнение поля зрения и анализатор поворачивается в положение, при котором наблюдается наибольший контраст между соседними доменами. Осциллографирование петель гистерезиса производится в том же положении поляризатора и анализатора, что и при наблюдении доменной структуры. Иногда возможен сдвиг фазы по горизонтали. Это проявляется в том, что при увеличении тока в кольцах, наряду с увеличением «усов» у петли гистерезиса, изменяется ее ширина. С помощью фазовращателя надо добиться такого состояния, чтобы ширина петли при изменении величины тока в кольцах не изменялась.

Наличие одноосной анизотропии в плоскости пленки приводит к различию в характере процессов перемагничивания под разными углами к оси легкого намагничивания («легкой оси», Л. О. на рис. 3, *а*).

Для примера на рис. 3, *а* показана доменная структура пленки, возникающая при размагничивании ее под разными углами к легкой оси. По мере увеличения угла доменная структура принимает вид более узких полос.

На рис. 3, *б* показан процесс перемагничивания пленки вдоль легкой оси. При приложении обратного магнитного поля к предварительно намагниченной пленке на краях пленки возникают клинообразные домены. Направление векторов намагниченности в них совпадает с направлением перемагничивающего поля. Увеличение магнитного поля сопровождается ростом размеров возникших доменов путем смещения границ. В поле, превышающем 5,15 *э*, пленка полностью перемагничивается.

На рис. 3, *в* показан процесс намагничивания пленки под углом к легкой оси из размагниченного состояния. В этом случае наряду с процессами смещения границ идут процессы вращения намагниченности. При визуальном наблюдении это проявляется в изменении контраста между соседними доменами.

Наличие магнитной анизотропии у пленок хорошо отображается видом петель гистерезиса (рис. 3, *г*), снятых при перемагничивании пленок под разными углами к оси легкого намагничивания. По мере увеличения угла прямоугольность петель уменьшается, они становятся более пологими. Петля гистерезиса, снятая под углом 90° к легкой оси, становится практически безгистерезисной.

По петлям гистерезиса в легком и в трудном направлениях возможно определение таких магнитных характеристик, как коэрцитивная сила H_c и поле анизотропии

H_k. Например, коэрцитивную силу можно определить из петли гистерезиса в легком направлении по формуле: $H_c = \frac{Ci\sqrt{2}d}{L}$, где C — постоянная перемагничивающих

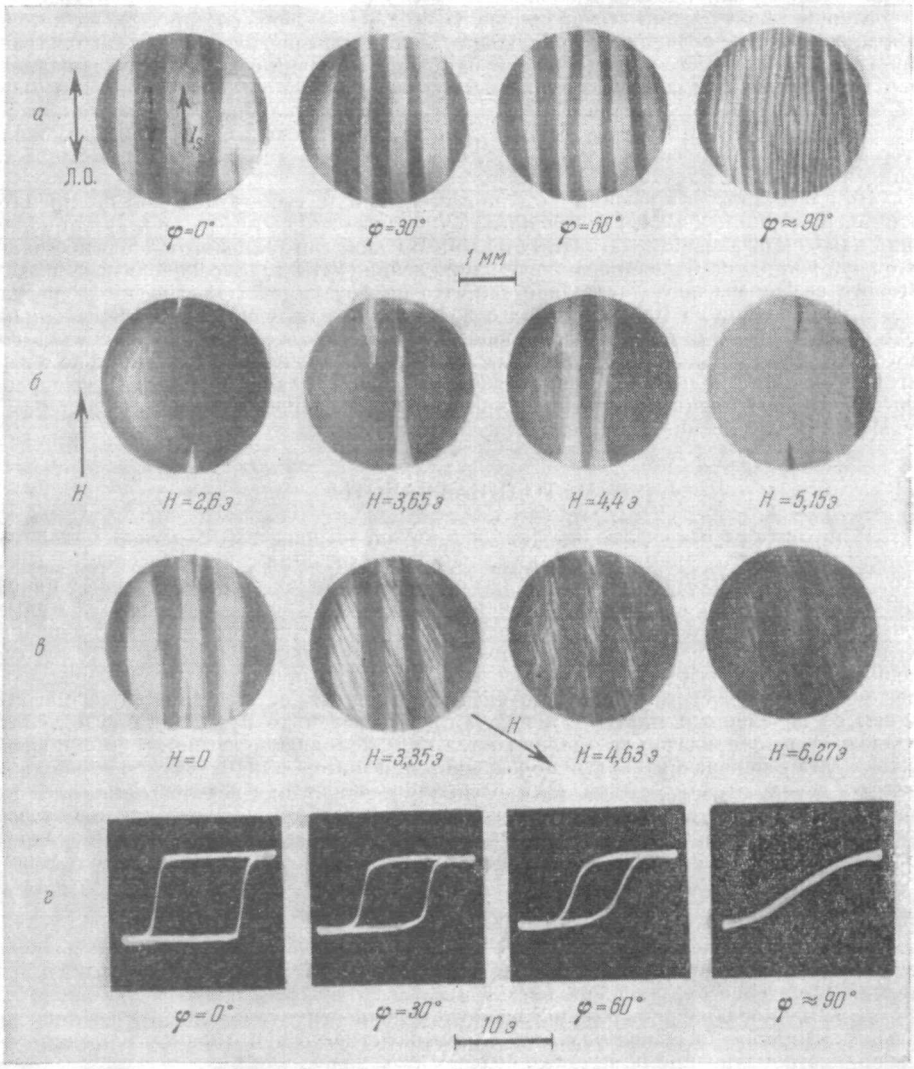

Рис. 3. Доменная структура и петли гистерезиса пленки пермаллоя толщиной 1200 Å, полученные с помощью эффекта Керра.

колец, i — эффективное значение тока в кольцах, L — величина развертки, d — ширина петли гистерезиса.

Иркутский государственный педагогический институт

В. С. Христосенко
А. А. Неделько

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Калашников, «Электричество», гл. XI, М., «Наука», 1964.
2. Г. С. Ландсберг, «Оптика», § 161, М., 1954.
3. А. В. Соколов, «Оптические свойства металлов», М., 1964.
4. Сб. «Тонкие ферромагнитные пленки», под ред. Р. В. Телеснина, М., «Мир», 1964.
5. И. А. Апокин, Г. Ф. Кипаренко, «Тонкие магнитные пленки в вычислительной технике», М., «Энергия», 1964.