



DOI: <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu1.2016.2.7>

УДК 681.5.08

ББК 22.37

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТАЛЛОВ *IN SITU*

Игорь Александрович Белоус

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных технологий и систем,
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
igor.belous@vvsu.ru
ул. Гоголя, 41, 690014 г. Владивосток, Российская Федерация

Валентин Антонович Доценко

Кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и систем,
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
valentin.docenko@vvsu.ru
ул. Гоголя, 41, 690014 г. Владивосток, Российская Федерация

Аннотация. Описана автоматизированная установка для исследования магнитооптических свойств тонких пленок металлов *in situ*. Представлены технические характеристики и основные параметры установки. Приведены результаты исследования магнитооптических свойств образца, с предварительно напыленной *in situ* пленкой Fe толщиной около 100 Å, на подложке Si(111).

Разработанная автоматизированная система позволяет повысить точность, скорость и надежность при измерениях магнитооптических свойств тонких пленок в сверхвысоком вакууме.

Ключевые слова: метод поверхностного магнитооптического эффекта Керра, тонкие пленки, вакуумный модуль, автоматизация измерений, измерительная система.

Введение

Метод поверхностного магнитооптического эффекта Керра (МОЭК) – сравнительно новый способ изучения магнетизма ультратонких пленок. Этот относительно простой и недорогой метод впервые представили Муг и Бадер в 1985 году [3].

Физический принцип МОЭК состоит в том, что когда плоско поляризованный свет падает на магнитный материал, плоскость поляризации отраженного света поворачивается относительно плоскости поляризации падающего света [3]. Теоретическое объяснение эффекта Керра в том, что индекс преломления правостороннего циркулярно-поляризованного света и индекс преломления левостороннего циркулярно-поляризованного света становятся разными, когда материал намагничен. Любой плоско поляризованный свет может быть разложен на два циркулярно-поляризованных световых пучка. Величина угла поворота сигнала Керра для ферромагнитного материала в основном лежит между 10^{-4} – 10^{-3} град. на монослой. Величина сигнала Керра тем больше, чем больше угол падения-отражения луча света на поверхность и от поверхности образца, соответственно. Намагниченность образца меняется при изменении величины и направления магнитного поля. Изменение интенсивности сигнала Керра (которая пропорциональна повороту Керра и намагниченности образца) от величины магнитного поля дает кривую гистерезиса.

Магнитооптический эффект имеет два проявления – поворот плоскости поляризации отраженного от ферромагнитного образца света (угловой эффект) и изменение интенсивности отраженного света (интенсивностный эффект). Оба эффекта зависят от магнитного состояния образца и, следовательно, могут использоваться для изучения магнитных свойств ферромагнетиков. Кроме того, каждый из эффектов можно наблюдать при трех различных конфигурациях – меридиональной (продольной), экваториальной (поперечной) и полярной. Если добавить к этому то, что существует возможность варьировать поляризацию падающего света (p -, s -, а для интенсивностного эффекта и промежуточная), то становится ясно, что возможно множество способов использования этих эффектов для исследования ферромагнетиков.

Так как в общем случае магнитооптические эффекты малы, и угол вращения плоскости поляризации не превышает тысячных долей радиана, то это приводит к тому, что доля светового потока, несущая информацию о магнитном состоянии образца, оказывается много меньше полного светового потока, падающего на приемник света. Поэтому для выделения полезного сигнала применяются различные методы, которые можно разделить на две группы: с модуляцией падающего на образец светового потока и без модуляции. В свою очередь модуляционные методы можно разделить на метод модуляции интенсивности и метод модуляции угла поляризации. Исторически в первых экспериментах, использующих эффект Керра [2], использовались методы без модуляции, более простые в технической реализации.

Исследования магнитных материалов, в частности для записи и хранения информации, для которой используют доменную структуру, ведутся уже довольно давно. Вначале попытка измерения ширины граничного слоя между ферромагнитными доменами проводилась методом порошковых фигур с использованием электронного микроскопа. Однако этим методом в конечном итоге определялась не истинная ширина граничного слоя, а ширина дорожки, занятой магнитной суспензией.

Метод может с равным успехом использоваться при изучении изменения намагниченности исследуемого участка как за счет смещения доменных границ, так и за счет процесса вращения вектора намагниченности. Таким образом, исследуемым локальным объектом может быть отдельный домен ферромагнетика, мелкодисперсное включение однородной фазы, область ферромагнетика, окружающая отдельную дислокацию, зародыш перемагничивания, микроскопически малый ферромагнитный образец и т. д.

Описание автоматизированной установки

Основными целями [1] создания систем автоматизации экспериментальных исследований являются: 1) повышение эффективности и качества исследований на основе получения и уточнения более полных моделей исследуемых объектов, явлений и процессов; 2) получение

качественно новых научных результатов, достижение которых невозможно без применения автоматизации; 3) сокращение сроков и уменьшение трудоемкости научных исследований и комплексных испытаний.

Для проведения исследования магнитооптических свойств тонких пленок металлов *in situ* была разработана специализированная установка, которая позволяет проводить измерения магнитооптических характеристик пленок в процессе их непосредственного формирования в условиях сверхвысокого вакуума. Структурная схема установки состоит из следующих функциональных блоков (рис. 1):

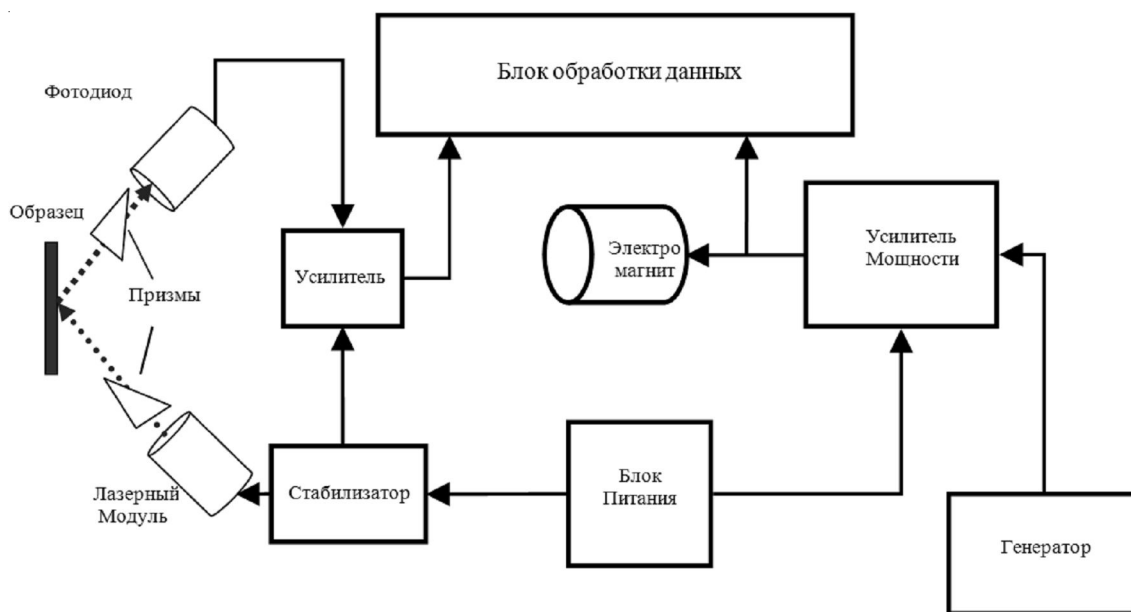


Рис. 1. Структурная схема установки

Фотоприемник. В качестве фотоприемника применен высокочувствительный кремневый фотодиод ФД256, работающий в фотодиодном режиме со смещением около 3В.

Усилитель. Инструментальный усилитель предназначен для нормализации уровня полезного сигнала до значения, требуемого для нормальной работы последующих блоков системы, и выполнен на прецизионном малошумящем операционном усилителе ОР37, включенном по схеме неинвертирующего усилителя.

Усилитель мощности. Конструктивно выполнен на специализированной интегральной микросхеме TDA7295 и предназначен для усиления модулирующего сигнала, поступающего с генератора, и питания им электромагнита. Все элементы усилителя мощности смонтированы на печатной плате из фольгированного стеклотекстолита. Интегральная микросхема прикреплена к теплоотводу.

Вакуумный модуль. Изготовленный вакуумный модуль для проведения измерений МОЭК конструктивно выполнен в виде вакуумного модуля (рис. 2) и состоит из катушки, помещенной в металлический корпус с двумя токовводами, и двух сердечников, расположенных на подвижной платформе, связанной с манипулятором. Манипулятор позволяет вращать электромагнит на 360°, тем самым изменяя направление магнитного поля в исследуемом образце. Вакуумный модуль расположен в сверхвысоковакуумной камере с базовым давлением 10^{-9} Торр на нижнем фланце.

Используя «Измеритель магнитной индукции Ш1-8», были проведены измерения зависимости индукции магнитного поля в зазоре сердечников электромагнита вакуумного модуля от величины протекающего через катушку электромагнита тока. Результаты измерений приведены на рисунке 3.

В качестве поляризаторов использовались призмы Глана PGL-10-VF 10 × 10 мм. Поляризирующие призмы предназначены для преобразования излучения с произвольной поляризацией в линейно-поляризованное. Состоит из двух призм, изготовленных из исландского шпата и разделенных воздушным промежутком. Рабочим является прошедший необыкновенный луч. Отраженный обыкновенный луч поглощается на черных нерабочих поверхностях. Наличие воздушного промежутка позволяет использовать призму во всей области прозрачности шпата. Когерентное лазерное излучение формируется Лазерным модулем KLM-M650-16-5.

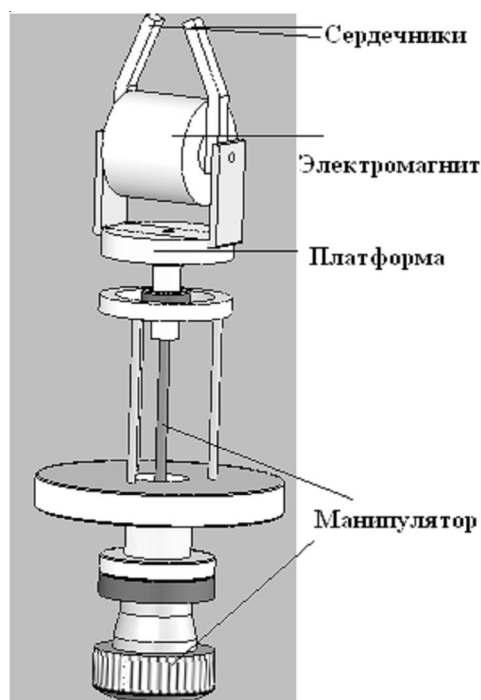


Рис. 2. Схематическое изображение вакуумного модуля

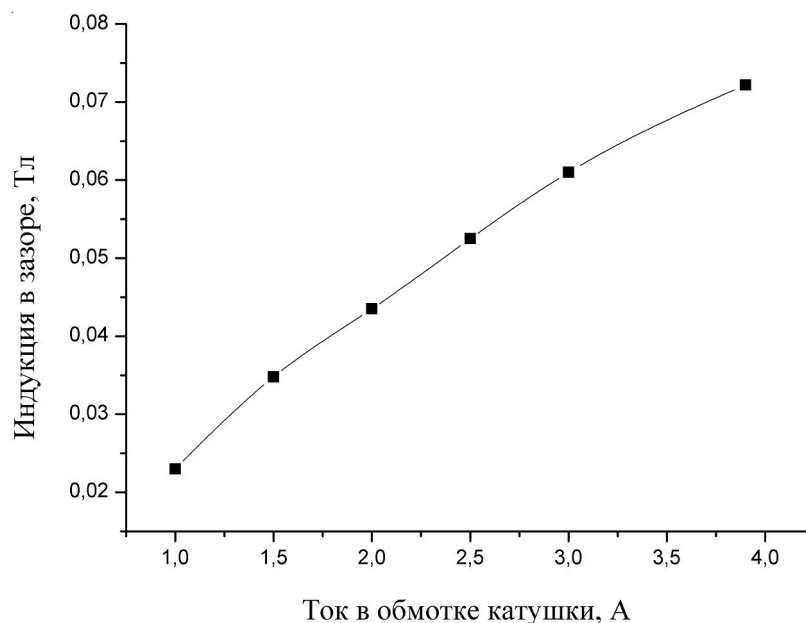


Рис. 3. Зависимость индукции магнитного поля в зазоре сердечников от тока в катушке

Блок данных обеспечивает требуемые операции по выделению, обработке и хранению информационно-формационных данных, и выполнен на базе рабочей станции и плат сбора данных L-Card L761.

Все измерения проводятся в сверхвысоковакуумной камере, в которой находятся: прикрепленный при помощи держателя к манипулятору исследуемый образец; источники; электромагнит с системой вращения. Из-за ограниченных размеров смотровых окон угол падения лазерного пучка к плоскости образца ограничен 45 ± 10 град.

Для предотвращения влияния механических вибраций на результаты измерений вакуумная камера расположена на антивибрационной платформе. Поляризованный лазерный пучок, сформированный лазерным модулем и поляризующей линзой, подается на образец через окно наблюдения; отраженный от поверхности образца луч направляется в другое окно наблюдения, за которым на стойке расположен фотоприемник. Для минимизации уровня помех инструментальный усилитель расположен непосредственно около фотоприемника и помещен в экранирующий кожух. Блок питания, стабилизатор, усилитель мощности и коммутационные устройства расположены в отдельном корпусе.

Разработанная система функционирует следующим образом: модулирующее колебание, сформированное генератором, с частотой F (15–50 Гц) усиливается по току и напряжению усилителем мощности и подается на катушку электромагнита, который обеспечивает необходимое направление и напряженность переменного магнитного поля, в котором находится исследуемый образец. На образец направлен пучок когерентного поляризованного лазерного излучения с длиной волны 650 нм, сформированный оптической системой, состоящей из лазерного модуля и поляризующей призмы Глана. Отраженный от образца лазерный луч, проходя через поляризующую призму, попадает на фотоприемник и вызывает изменение тока в нем. В качестве рабочего режима был выбран фотодиодный режим включения фотоприемника, так как именно он обеспечивает высокую линейность зависимости тока фотодиода от интенсивности падающего светового пучка. Усилитель выделяет переменную информационную составляющую из общего сигнала, поступающего с фотоприемника, и усиливает ее до необходимого значения. Информационные сигналы с усилителя и катушки электромагнита поступают, соответственно, на Y - и X -входы осциллографа С1-68 или платы сбора данных L-761.

Технические характеристики и основные параметры установки:

Максимальная частота сбора данных – 125 кГц.

Разрядность канала управления электромагнитом и канала фотоприемника – 14 бит.

Назначение системы – автоматизированное измерение поверхностного эффекта Керра.

Геометрия наблюдения эффекта Керра – полярная, продольная, поперечная.

Угол падения лазерного пучка к плоскости образца (измерения в сверхвысоковакуумной камере) – 45 ± 10 град.

Точность установки угла падения лазерного пучка к плоскости образца – не более 1 град.

Очистка образца – отжиг в течение 1–2 минут при температуре образца 1 250 °С в сверхвысоковакуумной камере при давлении 10^{-8} Торр.

Формирование пленки – сверхвысоковакуумная камера при давлении 10^{-8} Торр.

Проведение измерений – вне камеры (*out situ*), в сверхвысоковакуумной камере при (*in situ*) давлении 10^{-9} Торр через специализированные окна наблюдения.

Метод контроля покрытия – Оже-спектроскопия.

Используя разработанную систему, был исследован образец с предварительно напыленной *in situ* пленкой Fe, толщиной около 100 Å, на подложке Si(111). Тестовые измерения проводились *out situ* при комнатной температуре.

На рисунке 4 представлены результаты измерений – петля гистерезиса в координатах H-B (напряженность магнитного поля – магнитная индукция) при максимальной индукции магнитного поля в зазоре сердечника электромагнита около 0,06 Тл. Анализ петли гистерезиса пленки толщиной 100 Å на Si(111) показывает, что остаточная магнитная индукция составляет (B_r) около 0,3 Тл, коэффициент прямоугольности петли гистерезиса – около 0,85, коэрцитивная сила (H_c) – 0,3 от максимальной напряженности магнитного поля H_{max} .

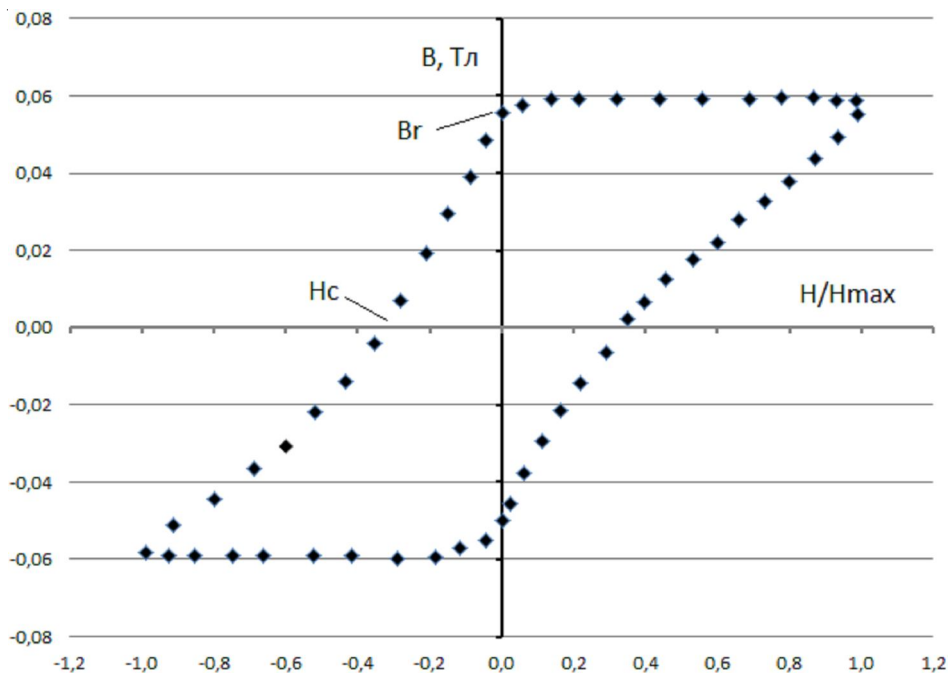


Рис. 4. Графическое изображение петли гистерезиса. Fe(100 Å) / Si(111)

Заключение

МОЭК – идеальный способ для изучения тонкопленочной магнитной анизотропии, причем один магнит может быть использован для измерения МОЭК в двух конфигурациях простым поворотом. Так, поворот, реализованный разработанным вакуумным модулем, между полярной и продольной либо полярной и поперечной конфигурациями позволяет изучать новые эффекты, связанные с перпендикулярной анизотропией в сверхтонких магнитных пленках. Соответственно, поворот магнита между продольной и поперечной конфигурациями позволяет анализировать тонкопленочную магнитную анизотропию на поверхности.

Разработанная автоматизированная установка позволяет существенно повысить точность, скорость и надежность при измерениях магнитооптических свойств тонких пленок в сверхвысоком вакууме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измерения в электронике / В. А. Кузнецов, В. А. Долгов, В. М. Коневских [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.
2. Kerr, J. On Rotation of the Plane of the Polarization by Reflection from the Pole of a Magnet / J. Kerr // *Philosophical Magazine*. – 1877. – № 3. – P. 321.
3. Moog, E. R. Smoke signals from ferromagnetic monolayers: p(1 × 1) Fe/Au(100) / E. R. Moog, S. D. Bader // *Superlattices and Microstructures*. – 1985. – Vol. 1, iss. 6. – P. 543–552.

REFERENCES

1. Kuznetsov V.A., Dolgov V.A., Konevskikh V.M., et al. *Izmereniya v elektronike* [Measurements in Electronics]. Moscow, Energoatomizdat Publ, 1987. 512 p.
2. Kerr J. On Rotation of the Plane of the Polarization by Reflection from the Pole of a Magnet. *Philosophical Magazine*, 1877, no. 3, p. 321.
3. Moog E.R., Bader S.D. Smoke Signals From Ferromagnetic Monolayers: p(1 × 1) Fe/Au(100). *Superlattices and Microstructures*, 1985, vol. 1, iss. 6, pp. 543-552.

**AUTOMATED SYSTEM FOR STUDYING
MAGNETO-OPTICAL PROPERTIES
OF THIN FILMS OF METALS *IN SITU***

Igor Aleksandrovich Belous

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor, Department of Information Technology and Systems,
Vladivostok State University of Economics and Service
igor.belous@vvsu.ru
Gogolya St., 41, 690014 Vladivostok, Russian Federation

Valentin Antonovich Dotsenko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Technology and Systems,
Vladivostok State University of Economics and Service
valentin.docenko@vvsu.ru
Gogolya St., 41, 690014 Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The method of surface magneto-optical Kerr effect (MOEK) a relatively new method of studying the magnetism of ultrathin films. This relatively simple and inexpensive method was presented for the first time by Moog and Bader in 1985 [3].

The main objectives of [1] are the creation of experimental studies of automation systems: 1) improving the efficiency and quality of research on the basis of preparation and refinement of more complete models of the objects, phenomena and processes; 2) preparation of a qualitatively new scientific results, the achievement of which is impossible without the use of automation; 3) reducing the time and reducing the complexity of research and complex tests.

To conduct the study of magneto-optical properties of the *in situ* metal thin films, special installation has been developed, which allows measurement of magneto-optical characteristics of the films in the process of direct formation in ultrahigh vacuum.

Using the developed system, a sample was provisionally deposited *in situ* film Fe, a thickness of about 100 Å, to the substrate Si(111) was investigated. Measurements were carried out at room temperature.

The developed automated system can significantly improve the accuracy, speed and reliability when measuring magneto-optical properties of thin films in an ultrahigh vacuum.

Key words: method of surface magneto-optical Kerr effect, thin films, vacuum unit, automation of measurement, measuring system.