

Магнитооптические свойства Fe/полидифениленфталид/Fe тонкопленочных образцов

А. В. Макаров, Е. А. Ганьшина, Е. Е. Шалыгина*

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра магнетизма
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

(Поступила в редакцию 11.05.2022; подписана в печать 31.05.2022)

В настоящее время электропроводящие полимеры, созданные в конце XX века, привлекают внимание исследователей благодаря разнообразию их механических и оптических свойств, а также высокой проводимости. Наиболее заслуживающим внимание полимером является полидифениленфталид — ПДФ. Анализ существующих данных показал, что к настоящему времени получена достаточно большая информация о физических свойствах ПДФ образцов, но практически отсутствуют данные о влиянии полимера, входящего в состав композитных многослойных магнитных систем, на их магнитооптические свойства. Кроме того, особый интерес заслуживает изучение ранее неисследованных спектральных зависимостей экваториального эффекта Керра (ЭЭК) для трехслойных Fe/ПДФ/Fe систем, с помощью которого можно получить информацию об электронной и магнитной структуре образцов. Следует отметить, что магнитные характеристики и особенности магнитополового поведения Fe/ПДФ/Fe систем были исследованы и опубликованы авторами данной работы ранее в журнале «Физика твердого тела», т. 60, № 9. С. 1693. Вместе с тем магнитооптические свойства этих систем практически не изучались. Учитывая этот факт, представленная работа посвящена магнитооптическому исследованию трехслойных Fe/ПДФ/Fe низкоразмерных тонкопленочных магнитных систем.

В работе впервые представлены результаты исследования магнитооптических свойств трехслойных Fe/ПДФ/Fe низкоразмерных тонкопленочных магнитных систем. Измерения выполнены на магнитооптическом магнитометре с помощью экваториального эффекта Керра. Обнаружено, что значения поля насыщения, наблюдаемые для изучаемых тонкопленочных систем, зависят от толщины, как слоя железа, так и ПДФ слоя. Этот факт объясняется взаимодействием ферромагнитных слоев с ПДФ слоями. Обнаружено, что вид спектральных зависимостей экваториального эффекта Керра, наблюдаемый для Fe/ПДФ/Fe тонкопленочных систем с толщиной железа, равной 30 нм, подобен магнитооптическим спектрам, обнаруженным для ферромагнитных пленок. Вместе с тем величина магнитооптического эффекта зависит от толщины ПДФ слоя — в частности, уменьшается при увеличении толщины ПДФ прослойки. Этот факт объясняется уменьшением влияния слоя ферромагнитного металла на магнитооптический сигнал с ростом толщины неферромагнитной прослойки.

PACS: 537.622, 537.632.

УДК: 75.70.-i; 75.75.-c

Ключевые слова: магнитные характеристики, магнитооптические свойства, магнитооптический эффект, полимеры, поле насыщения, трехслойные тонкопленочные структуры.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению многослойных тонкопленочных систем обусловлен их уникальными свойствами, такими как гигантское магнитосопротивление [1], обменное взаимодействие [2], квантовые размерные эффекты [3] и др. Следует отметить, что в качестве материала для немагнитных прослоек могут использоваться как диамагнетики, так и парамагнетики. Особое внимание при этом заслуживают тонкопленочные системы с полимерными слоями. Этот факт обусловлен уникальной особенностью вышеуказанных образцов, проявляющейся в изменении их свойств под влиянием внешних воздействий.

В настоящее время для исследования указанных выше систем активно применяются магнитооптические методы, которые позволяют получать информацию об электронной и магнитной структуре тонкопленочных

систем [4]. При этом необходимо отметить следующий факт. В последние годы активно изучаются несопряженные полимеры из группы полиариленфталидов. Уникальная особенность этих материалов проявляется в возможности управления их электрическими и магнитными свойствами с помощью слабых внешних воздействий, например, температуры, давления и магнитного поля [5]. Эти свойства могут быть востребованы при разработке новых высокочувствительных элементов, перспективных для практических приложений, в частности, в микроэлектронике.

Наиболее заслуживающим внимание полимером является полидифениленфталид. При нормальных внешних условиях он является диэлектриком с широкой запрещенной зоной [6]. Вместе с тем было обнаружено, что в многослойных системах металл/ПДФ/металл тонкий слой полидифениленфталид переходит в состояние с высокой проводимостью, если к образцу приложено давление [7] или магнитное поле [8]. Этот переход был объяснен изменением химической структуры ПДФ слоя, в частности, уменьшением длины связи между молекулами и образованием проводящих

* shalygina.ee@gmail.com

каналов, перпендикулярных поверхности пленки [6]. Изучение магнитополевого поведения указанных выше трехслойных образцов позволяет определить, какое влияние ПДФ слои оказывают на магнитные свойства и электронную структуру Fe/ПДФ/Fe тонкопленочных систем. Наиболее эффективным методом получения информации о магнитополеведении указанных выше образцов является магнитооптический, в частности, экваториальный эффект Керра (ЭЭК). В этом случае необходимую информацию для указанных выше тонкопленочных систем можно получить путем измерения для Fe/ПДФ/Fe трехслойных систем спектральных зависимостей ЭЭК.

Целью данной работы является изучение влияния слоя полидифениленфталаида на магнитные свойства трехслойных Fe/ПДФ/Fe систем с помощью ЭЭК в области энергии квантов падающего света от 0.5 до 3.7 эВ.

1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Изучаемые образцы

Образцы Fe/ПДФ/Fe были созданы в лаборатории УФИЦ РАН. Полимерные слои изучаемых трехслойных образцов были получены с помощью метода центрифугирования. Для изготовления слоев различной толщины применялись растворы полимера в циклогексаноне с различной концентрацией. Выбор концентрации определялся толщиной формируемой пленки. Следует отметить, что полимерные растворы с концентрацией от 1 до 10% позволяют получать ПДФ пленки толщиной от 5 нм до 1.3 мкм.

ПДФ образцы имеют следующие свойства. В зависимости от условий синтеза они могут обладать молекулярной массой порядка $5 \times 10^4 - 7 \times 10^4$ г/Моль. При изготовлении образцов Fe/ПДФ/Fe нижний и верхний слои железа (Fe_1 , Fe_2) обычно наносятся на стеклянную подложку и полимерную прослойку методом вакуумного термодиффузионного напыления.

В данной работе для образцов с толщиной слоев Fe, равной 15 (нижний слой) и 16 нм (верхний слой), толщина ПДФ слоев была равна 10 и 20 нм (рис. 2), а в случае толщины слоев Fe, равной 30 нм, толщина ПДФ слоев была равна 13 и 30 нм (рис. 3).

Толщина железных и полимерных слоев контролировалась с помощью микроинтерферометра МП-4М и атомно-силового микроскопа, соответственно. Средняя длина молекул была порядка 100–150 нм.

Было установлено, что изучаемые полимерные образцы характеризуются повышенной термостойкостью. В частности, температура размягчения порядка 360°C, а разрушения $\sim 440^\circ\text{C}$. Следует отметить, что изучаемые в работе полимеры растворимы в органических растворителях, например, таких как хлороформ, метилхлорид, циклогексанон. Это позволяло эффективно очищать его от примесей. В обычном состоянии ПДФ

пленки являются диэлектриками. При этом они характеризуются следующими параметрами: ширина запрещенной зоны порядка 4.3 эВ, первый потенциал ионизации порядка 6.2 эВ.

1.2. Методика эксперимента

Магнитооптические свойства описанных выше образцов были изучены путем измерения спектральных зависимостей экваториального эффекта Керра (ЭЭК) при комнатной температуре в диапазоне энергий квантов падающего света 0.5–3.7 эВ. Магнитное поле $\mathbf{H}$ было приложено в плоскости тонкопленочных образцов и параллельно их длинной стороне. Значение $\mathbf{H}$ превышало поле насыщения H_S изучаемых образцов. Измерения ЭЭК осуществлялись с помощью квазидинамического метода регистрации магнитооптических сигналов. В этом случае образец перемагничивался переменным магнитным полем низкой частоты, что обуславливало модуляцию значения ЭЭК. Это позволяет использовать методику синхронного детектирования магнитооптических сигналов и существенно повышает чувствительность экспериментальной установки.

Суть методики заключалась в следующем. Свет, источником которого является галогеновая лампа, проходит через двойной монохроматор, на котором с помощью барабана устанавливается длина волны проходящего света. После монохроматора свет проходит через поляризатор, который выделяет р-компоненту. Исследуемый образец перемагничивается с помощью электромагнита переменным магнитным полем, приложенным перпендикулярно плоскости падения света и параллельно отражающей поверхности образца. Перемагничивание образца обуславливает модуляцию интенсивности отраженного света с той же частотой, с которой изменяется магнитное поле (30 Гц). Отраженный свет определяется значениями как постоянной компоненты отраженного света, так и переменной. Первая компонента пропорциональна интенсивности отраженного света, а вторая — изменению интенсивности при перемагничивании образца. Интенсивность поляризованного света, отраженного от образца, фиксируется с помощью фотоприемника, в качестве которого используется фотоэлектронный умножитель ФЭУ со спектральной областью чувствительности в интервале 1.5–4.5 эВ. Для увеличения чувствительности экспериментальной установки в области энергий падающего света 0.5–1.7 эВ в качестве фотоприемника используется фотоспротивление PbS. При измерениях с помощью PbS пучок света модулируется механическим прерывателем с частотой 30 Гц. Регистрация интенсивности отраженного света осуществляется с помощью усилителя УПИ-2, опорный сигнал на который подается с фотодиода, расположенного перед входной щелью монохроматора [9].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С целью корректной оценки влияния полимерного слоя на магнитные свойства изучаемых образцов в начале были измерены спектральные зависимости ЭЭК от энергии квантов падающего света для пленки железа с толщиной, равной 30 нм (рис. 1).

Затем аналогичные измерения спектральных зависимостей ЭЭК были выполнены для образцов с различными значениями толщины железа и ПДФ слоя, приведенными ниже:

1. Fe(15 нм)/ПДФ(10 нм)/Fe(16 нм),
2. Fe(15 нм)/ПДФ(20 нм)/Fe(16 нм),
3. Fe(30 нм)/ПДФ(13 нм)/Fe(30 нм),
4. Fe(30 нм)/ПДФ(30 нм)/Fe(30 нм).

Результаты измерений спектральных зависимостей

экваториального эффекта Керра, полученные для изучаемых образцов, приведены на рис. 1–3.

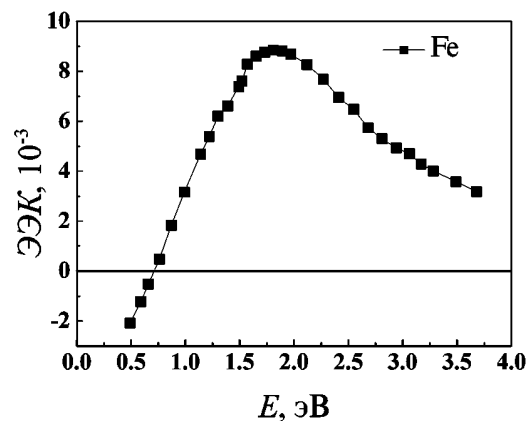


Рис. 1. Спектральная зависимость ЭЭК, наблюдаемая для образца с толщиной слоя железа, равной 30 нм

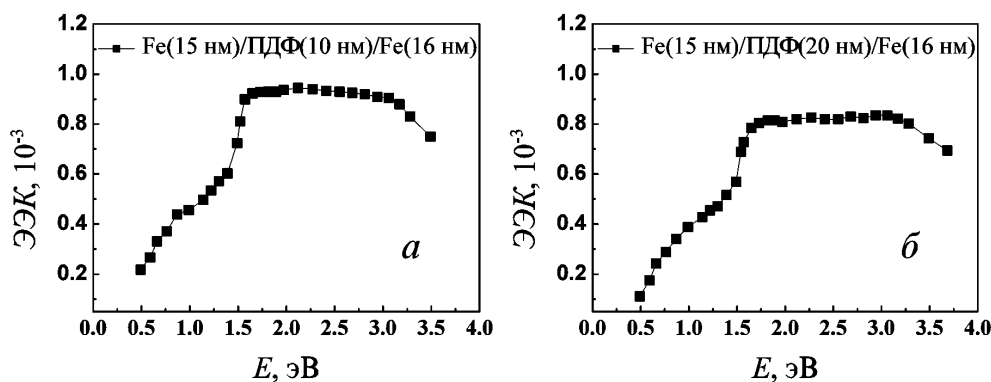


Рис. 2. Спектральные зависимости ЭЭК, наблюдаемые для изучаемых образцов с толщиной слоев ПДФ = 10 нм и 20 нм (а и б соответственно)

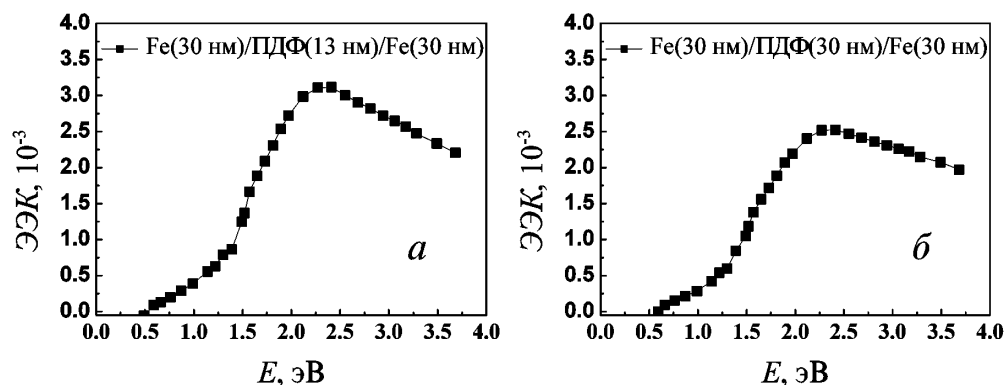


Рис. 3. Спектральные зависимости ЭЭК, наблюдаемые для изучаемых образцов с толщиной слоев ПДФ = 13 нм и 30 нм (а и б соответственно)

Анализ приведенных выше данных показал следующее. Для всех изучаемых Fe/ПДФ/Fe образцов при некоторых значениях энергии падающего света (E , эВ) наблюдаются максимальные значения ЭЭК. В случае образца с толщиной слоя железа, равной 30 нм (рис. 1), максимальное значение ЭЭК было порядка 8.9×10^{-3} . Вместе с тем было найдено, что в случае трехслойных образцов значение ЭЭК зависит от толщины как железных, так и ПДФ слоев. Сравнение данных, приведенных на рис. 2 и 3, показало следующее. Максимальное значение ЭЭК наблюдается для образца с толщиной ПДФ слоя, равной 13 нм (рис. 3, а) и составляет порядка 3.1×10^{-3} , а минимальное — для образца с толщиной ПДФ слоя, равной 20 нм (рис. 2, б). При этом для образца с толщиной полимерного слоя, равной 13 нм, ЭЭК порядка 3.1×10^{-3} .

Для Fe/ПДФ/Fe образцов было обнаружено также уменьшение ЭЭК при увеличении толщины промежуточного слоя полимера (рис. 3, а, б). Причиной этого является усиление взаимодействия между Fe и ПДФ слоями. Этот факт согласуется с существующими данными, приведенными в работах [10, 11].

В тонкопленочных образцах, приведенных на рис. 2 и 3, максимальное значение ЭЭК наблюдается при минимальном значении ПДФ слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получена информация о магнитооптических свойствах трехслойных Fe/ПДФ/Fe низкоразмерных тонкопленочных магнитных систем. Измерения выполнены на магнитооптическом магнитометре с помощью экваториального эффекта Керра. Установлено, что значения поля насыщения, наблюдаемые для изучаемых тонкопленочных систем, зависят от толщины, как слоя железа, так и ПДФ слоя. Этот факт объясняется взаимодействием ферромагнитных слоев с ПДФ слоями. Обнаружено, что вид спектральных зависимостей экваториального эффекта Керра, наблюдаемый для Fe/ПДФ/Fe тонкопленочных систем с толщиной железа, равной 30 нм, подобен магнитооптическим спектрам, обнаруженным для ферромагнитных пленок. Вместе с тем величина магнитооптического эффекта зависит от толщины ПДФ слоя — в частности, уменьшается при увеличении толщины ПДФ прослойки. Этот факт объясняется уменьшением влияния слоя ферромагнитного металла на магнитооптический сигнал с ростом толщины неферромагнитной прослойки. Результаты проведенных исследований могут быть полезны при разработке различных устройств прикладного назначения.

-
- [1] Fullerton E.E., Conover M.J., Mattson J.E., Sowers C.H., Bader S.D. // Appl. Phys. Lett. 1993. **63**, N 12. P. 1699.
 - [2] Altuncevalir B., Koumen A.R. // Journal of Magn. Magn. Mater. 2003. **261**, N 3. P. 424.
 - [3] Jones B.A., Hanna C.B. // Phys. Rev. Lett. 1993. **71**, N 25. P. 4253.
 - [4] Ганьшина Е.А., Богородицкий А.А., Кумаритова Р.Ю., Бибилова В.В., Смирницкая Г.В., Цидаева Н.И. // ФТТ. 2001. **43**, № 6. С. 1061.
 - [5] Салазкин С.Н., Шапошникова В.В., Мачуленко Л.Н., Гилева Н.Г., Крайкин В.А., Лачинов А.Н. // Выс. мол. соед., сер. А. 2008. **50**, № 3. С. 399.
 - [6] Лачинов А.Н., Воробьева Н.В. // УФН. 2006. **176**, № 12. С. 1249.
 - [7] Бунаков А.А., Лачинов А.Н., Салихов Р.Б. // Журн. тех. физ. 2003. **73**, № 5. С. 104.
 - [8] Лачинов А.Н., Воробьева Н.В., Лачинов А.А. // Письма в ЖЭТФ. 2006. **84**, № 11. С. 720.
 - [9] Новиков А.И. Исследование магнитооптических свойств Ni-Mn — содержащих сплавов Гейслера и разбавленных магнитных полупроводников GaMnAs(Sb) и TiO₂:V. Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. 2016.
 - [10] Буравцова В.Е., Ганьшина Е.А., Дмитриев А.А., Иванова О.С., Калинин Ю.Е., Ситникова А.В. // Изв. Росс. акад. наук. Сер. Физ. 2009. **73**, № 9. С. 1374.
 - [11] Ганьшина Е.А., Перов Н.С., Пхонгхирун С., Мигунов В.Е., Калинин Ю.Е., Ситников А.В. // Изв. Росс. акад. наук. Сер. Физ. 2008. **72**, № 10. С. 1455.

Magneto optic properties of Fe/polydiphenylenephthalide/Fe thin-film systems

A. V. Makarov, E. A. Gan'shina, E. E. Shalygina^a

Department of magnetism, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia
E-mail: ^aShalygina.ee@gmail.com

Currently, electrically conductive polymers created at the end of the 20th century attract the attention of researchers due to the variety of their mechanical and optical properties, as well as their high conductivity. The most noteworthy polymer is polydiphenylenephthalide - PDP. An analysis of the existing data has shown that by now quite a lot of information has been obtained on the physical properties of PDP samples, but there are practically no data on the effect of the polymer, which is part of composite multilayer magnetic systems, on their magneto-optical properties. In addition, of particular interest is the study of the previously unexplored spectral dependences of the equatorial Kerr effect (TKE) for three-layer Fe/PDP/Fe systems, which can

be used to obtain information about the electronic and magnetic structure of the samples. It should be noted that the magnetic characteristics and features of the magnetic field behavior of Fe/PDP/Fe systems were studied and published by the authors of this work earlier in the journal Solid State Physics, volume 60, issue № 9., P. 1693. At the same time, the magnetooptical properties of these systems have practically not been studied. Taking this fact into account, the present work is devoted to the magneto-optical study of three-layer Fe/PDP/Fe low-dimensional thin-film magnetic systems.

This paper presents for the first time the results of a study of the magneto-optical properties of three-layer Fe/PDP/Fe low-dimensional thin-film magnetic systems. The measurements were made on a magneto-optical magnetometer using the equatorial Kerr effect. It is found that the values of the saturation field observed for the studied thin-film systems depend on the thickness of both the iron layer and the PDP layer. This fact is explained by the interaction of ferromagnetic layers with PDP layers. It is found that the shape of the spectral dependences of the equatorial Kerr effect observed for Fe/PDP/Fe thin-film systems with an iron thickness of 30 nm is similar to the magneto-optical spectra found for ferromagnetic films. At the same time, the magnitude of the magneto-optical effect depends on the thickness of the PDP layer; in particular, it decreases with an increase in the thickness of the PDP layer. This fact is explained by the decrease in the influence of the ferromagnetic metal layer on the magneto-optical signal with an increase in the thickness of the non-ferromagnetic layer.

PACS: 75.70.-i; 75.75.+a.

Keywords: magnetic characteristics, magneto-optical properties, magneto-optic effect, polymers, saturation field, three-layer thin-film structures.

Received 11 May 2022.

Сведения об авторах

1. Макаров Андрей Владимирович — аспирант; e-mail: andrey6257@gmail.com.
2. Ганьшина Елена Александровна — доктор физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-40-43, e-mail: eagan@mail.ru.
3. Шалыгина Елена Евгеньевна — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-35, e-mail: shalygina.ee@gmail.com.