

PACS numbers: 75.50.Bb, 75.50.Cc, 78.20.Ls, 78.66.Bz, 78.66.Qn, 81.07.Pr, 83.60.Np

## **Эффект Фарадея в тонких плёнках металлов Fe, Co, Ni на подложках из полиэтилентерефталата**

К. О. Шаповал, А. М. Касумов, Г. В. Лашкарёв

*Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины,  
ул. Академика Кржижановского, 3,  
03142 Киев, Украина*

Исследованы структуры из тонких плёнок ферромагнитных металлов на подложках из полиэтилентерефталата — Fe, Co, Ni/ПЭТ на предмет проявления в них магнитооптического эффекта Фарадея. Обнаружено влияние подложки и материала плёнок, которые были осаждены на полимере, на эффект Фарадея в этих структурах. Также было подтверждено магнитное взаимодействие между диамагнитной подложкой и магнитоактивными плёнками на ней.

**Ключевые слова:** осаждение, тонкая плёнка, полимер, эффект Фарадея, намагниченность.

Досліджено структури з тонких плівок ферромагнетних металів на підложках з поліетилентерефталату — Fe, Co, Ni/ПЕТ на предмет прояву в них магнитооптичного Фарадейового ефекту. Виявлено вплив підложки та матеріалу плівок, яких було осаджено на полімері, на Фарадейів ефект у цих структурах. Також було підтверджено наявність магнетної взаємодії між діамagnetним підложкам і магнитоактивними плівками на ньому.

**Ключові слова:** осадження, тонка плівка, полімер, Фарадейів ефект, намагнетованість.

The structures composed of thin films of ferromagnetic metals on polyethyl-

Corresponding author: Kseniia Olehivna Shapoval  
E-mail: xeniya\_shapoval@yahoo.com

*I. M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, N.A.S. of Ukraine,  
3 Academician Krzhyzhanovskyy Str., UA-03142, Kyiv, Ukraine*

Please cite this article as: K. O. Shapoval, A. M. Kasumov, and G. V. Lashkarev, Faraday Effect in Thin Films of Metals (Fe, Co, Ni) on Polyethyleneterephthalate Substrates, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 6: 815–821 (2017) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.39.06.0815.

eneterephthalate substrates, namely, Fe, Co, Ni/PET, are studied for the manifestation of the magneto-optical Faraday effect within them. Influence of both substrate and material of thin films deposited on the polymer to Faraday effect in these structures is detected. In addition, magnetic interaction between the diamagnetic substrate and the magnetoactive films on it is confirmed.

**Key words:** deposition, thin film, polymer, Faraday effect, magnetization.

*(Получено 29 мая 2017 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность управления свойствами плёнок за счёт воздействия на них со стороны подложек известна уже давно и широко используется на практике, например, в методе эпитаксии [1]. Расширить такие возможности позволяет использование в качестве подложек полимерных материалов, обладающих разветвлённой молекулярной структурой и рядом свойств (наличие органических обрамляющих групп, способных к реакции, гибкость, оптическая пропускаемость и т.д.), нехарактерных для традиционно применяемых в технике неорганических веществ. Особое внимание исследователей в этом направлении начал привлекать полиэтилентерефталат (ПЭТ), который, благодаря химической инертности, прочности, высокой температуре размягчения является перспективным материалом для использования в гибкой электронике [2].

Было установлено, что ПЭТ обладает магнитооптической активностью — в нём наблюдается значительный эффект Фарадея, который, как известно также характерен для тонких плёнок группы железа Fe, Co, Ni. Отсюда, в случае объединения их в двухслойную систему Fe, Co, Ni/ПЭТ возникает вероятность взаимного влияния полимерной подложки и осаждённой на ней плёнки металла и, в результате, появления новых магнитооптических свойств всей системы. Целью настоящей работы является изучение магнитооптических свойств тонких плёнок металлов Fe, Co, Ni на подложках из ПЭТ при условии влияния этих составных на общие свойства системы (Fe, Co, Ni)/ПЭТ.

## 2. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве подложки для плёнок Fe, Co, Ni использовались тонкие (0,1 мм) листы ПЭТ с высокой прозрачностью (88–90%) в области видимого света. Плёнки наносились с одной стороны подложки при следующих условиях: давление в рабочей камере  $5 \cdot 10^{-3}$  Па, температура подложки 25°C, скорость роста слоёв 10–20 нм/мин. Тол-

щина плёнок металла варьировалась в пределах 25–80 нм, при этом они были полупрозрачными и обладали островковой морфологией. Структура металлических плёнок была поликристаллической, полимерной подложки — аморфной. Исследования магнитооптических свойств проводились в красном свете ( $\lambda = 620$  нм).

В качестве источника светового излучения использовался монохроматор. Угол поворота плоскости поляризации света анализировался на полярископе ПКС-125. Толщина плёнок измерялась интерференционным микроскопом МИИ-4. Величина индукции постоянного магнитного поля определялась тесламетром марки 43205/1.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Плёнки ферромагнитных металлов (ФММ) — Me = Fe, Co, Ni, осаждённые на полимерную подложку ПЭТ, образуют двухслойную структуру Me/ПЭТ, которая способна вращать плоскость поляризации проходящего через неё света (эффект Фарадея) во внешнем магнитном поле. В случае нормального направления падения света, а также перпендикулярности к поверхности такой структуры векторов внешнего магнитного поля и намагниченности ФММ, угол поворота плоскости поляризации проходящего света может быть описан модифицированной формулой [3]:

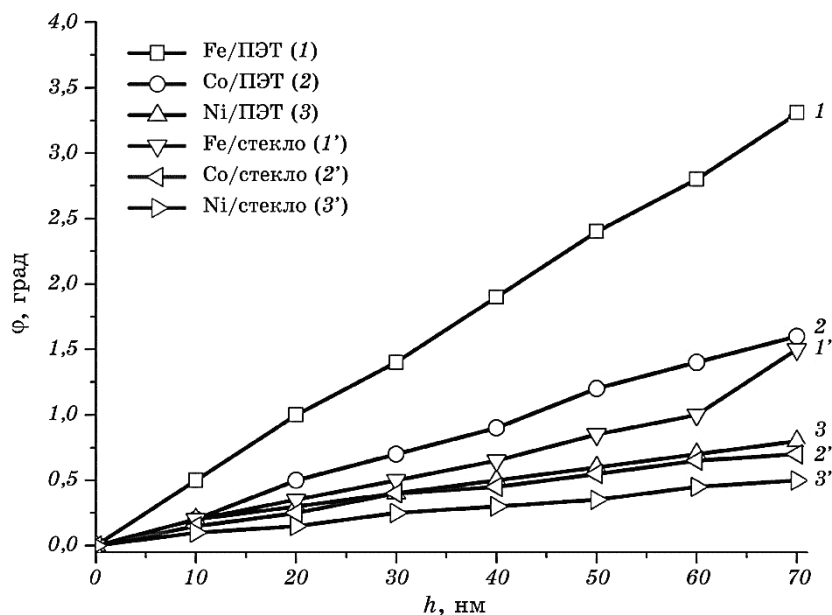
$$\varphi_{\text{Me}} = -\text{Re}\{n^{-1}\alpha M[\lambda^{-1}\pi h - i(4n)^{-1}(r_{21} - r_{23})]\}, \quad (1)$$

где индексы 1, 2, 3 соответствуют средам: воздуху, металлу Fe, Co, Ni и ПЭТ; матрицы отражения  $r_{ik}$  находятся по формулам Френеля:  $r_{ik} = (n_i + n_k)^{-1}(n_i - n_k)$ ,  $n_i$  и  $n_k$  — показатели преломления сред  $i$  и  $k$ ,  $\lambda$  — длина волны света,  $h$  — толщина плёнки металла,  $n$  — коэффициент преломления,  $\alpha = \text{const}$ ,  $M$  — намагниченность.

При выводе формулы (1) принято, что плёнка и подложка являются изотропными средами; плёнка имеет достаточно сильное поглощение, при котором многократным отражением света в ней можно пренебречь.

Как видно из формулы (1), угол поворота Фарадея для двухслойной системы пропорционален толщине  $h$  плёнки металла и её намагниченности  $M$ . Проверим выполнение данных условий на эксперименте.

На рисунке 1 показаны экспериментальные зависимости  $\varphi_{\text{Me}}$  от толщины слоя металла  $h$  для двухслойных систем Fe, Co, Ni/ПЭТ (кривые 1–3) и Fe, Co, Ni/стекло (кривые 1'–3'), полученные в условиях вывода формулы (1): направление света, магнитного поля и намагниченности перпендикулярны к поверхности систем. Поскольку толщина подложки ПЭТ не изменяется, то зависимости

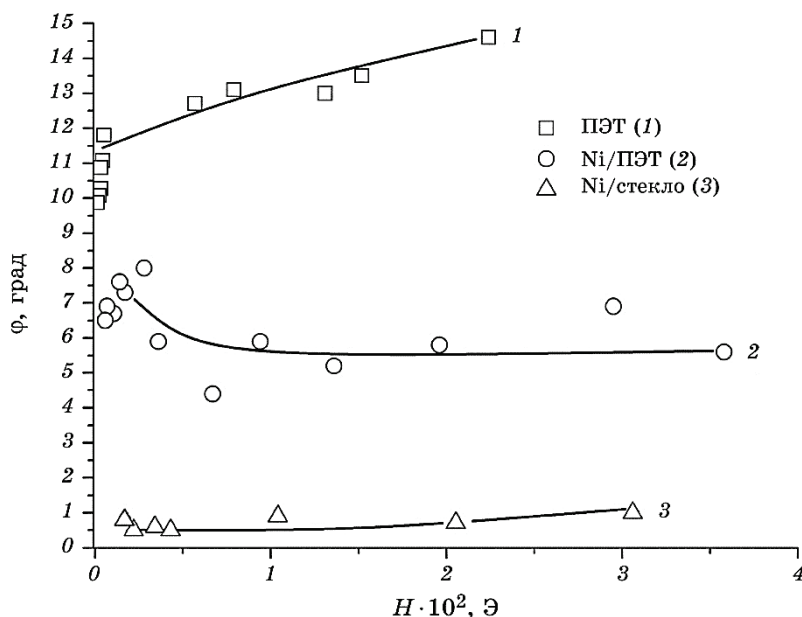


**Рис. 1.** Зависимости угла Фарадея от толщины плёнок Fe, Co, Ni, осаждённых на подложках из ПЭТ и стекла. Магнитное поле напряжённостью 2 кЭ перпендикулярно плоскости структуры.

**Fig. 1.** The Faraday angle dependences on the thickness of the Fe, Co, Ni films, which were deposited on PET (1–3) and glass (1'–3') substrates. A magnetic field of intensity 2 kOe is perpendicular to the plane of a structure.

$\varphi_{Me}(h)$  для систем Fe, Co, Ni/ПЭТ были получены как разница угла поворота  $\varphi_{\Sigma}$  всей системы и угла  $\varphi_{ПЭТ}$ , даваемого подложкой без плёнки металла:  $\varphi_{Me} = \varphi_{\Sigma} - \varphi_{ПЭТ}$ . Напряжённость магнитного поля равна 2 кЭ. Стекло является гарантированно нейтральной подложкой, обладающей химической инертностью и не имеющей эффекта Фарадея.

Из рисунка 1 видно, что на подложках из стекла и ПЭТ требуемая согласно формуле (1) линейность зависимости  $\varphi_{ФММ}(h)$  выполняется. Сохраняется и закономерность уменьшения величины  $\varphi_{ФММ}$  при переходе от Fe к Co и Ni, соответствующая уменьшению намагниченности этих металлов. Однако на подложке из ПЭТ углы  $\varphi_{ФММ}$  значительно больше, чем на магнитооптически интерном стекле. Это может быть вызвано взаимодействием, осуществляющимся между ПЭТ и металлом, приводящим, например, к росту механических напряжений в островках плёнки, стимулирующих усиление эффекта Фарадея. В таком случае рисунок 1 является ожидаемым свидетельством влияния полимерной подложки ПЭТ на магнитооптические свойства расположенных на них тонких плёнок Fe, Co, Ni.



**Рис. 2.** Зависимости угла Фарадея от напряжённости магнитного поля для структур Ni/стекло (1), Ni/ПЭТ (2) и чистого ПЭТ (3).

**Fig. 2.** Dependences of the Faraday angle on the magnetic field strength for the Ni/glass (1), Ni/PET (2), and pure PET (3) structures.

На рисунке 2 представлена зависимость угла Фарадея  $\phi$  от напряжённости  $H$  магнитного поля для двухслойных систем Ni/стекло (3), Ni/ПЭТ (2) и чистого ПЭТ (1) без металлической плёнки.

Из рисунка видно, что чистый ПЭТ демонстрирует большое значение  $\phi$ , поскольку имеет значительную толщину (0,1 мм) по сравнению с плёнкой Ni (70 нм). Чувствительность ПЭТ к магнитному полю обусловлена диамагнитными свойствами всех молекулярных групп, входящих в состав данного полимера [4].

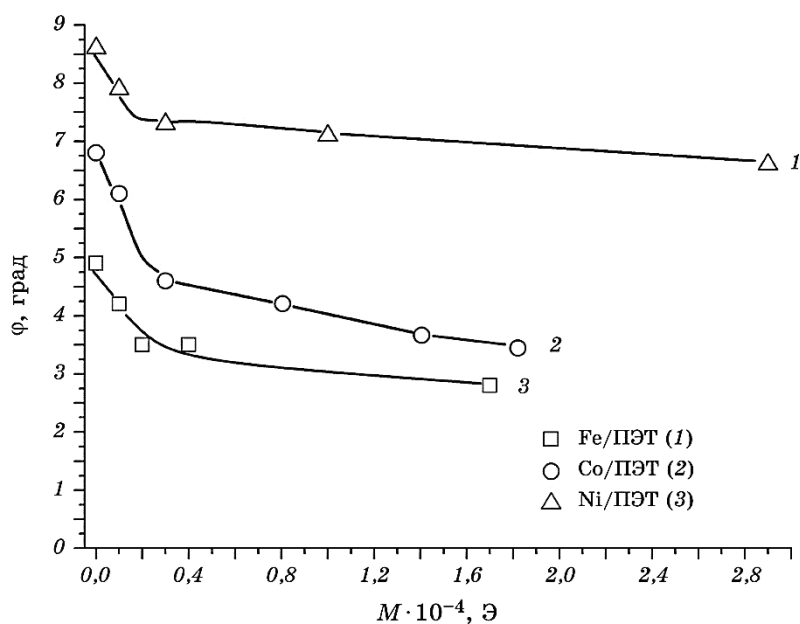
На подложке из стекла, не имеющего магнитооптической активности, с ростом  $H$  наблюдается увеличение  $\phi$ , что согласно формуле (1), связано с увеличением намагничённости ферромагнитной плёнки Ni.

В двухслойной системе Ni/ПЭТ зависимость  $\phi(H)$  имеет сложный характер: с ростом  $H$  угол  $\phi$  уменьшается. Такое поведение  $\phi$  может быть вызвано взаимодействием намагничённой плёнки с диамагнитными молекулярными группами ПЭТ. Возможность такого химического и магнитного взаимодействия показана нами в [5]. Данное взаимное влияние плёнки Ni и подложки ПЭТ, усиливающееся с ростом  $H$ , по-видимому, и уменьшает эффект Фарадея.

Указанная особенность является общей для систем Fe, Co, Ni/ПЭТ, что хорошо видно на рис. 3. Здесь представлена зависимость  $\varphi$  систем, содержащих плёнки Fe (1), Co (2) и Ni (3) на подложке ПЭТ, от их намагниченности  $M$ , возрастающей с увеличением  $H$ .

Как следует из данного рисунка, наибольший спад кривых  $\varphi(M)$  наблюдается для Fe, обладающего наибольшей способностью к намагничиванию и наибольшей химической активностью среди металлов своей группы. То есть Fe также обладает самой большой склонностью к взаимодействию с молекулярными группами ПЭТ и подавлению его магнитооптических свойств при увеличении намагниченности системы Fe/ПЭТ. И, наоборот, наименьший спад кривой  $\varphi(M)$  соответствует плёнкам Ni, имеющим наименьшую способность к намагничиванию и более слабую химическую активность. Химическое и магнитное взаимодействие между ферромагнитными плёнками и полимерной подложкой, по-видимому, оказывает влияние на магнитооптические свойства систем Fe, Co, Ni/ПЭТ.

Из рисунка 3 также видно, что зависимость  $\varphi(M)$  не является линейной, как того требует теоретическая формула (1). Нарушение линейности зависимости  $\varphi(M)$  связано с взаимодействием плёнок



**Рис. 3.** Зависимости угла Фарадея для плёнок Fe (1), Co (2), Ni (3) на подложках из ПЭТ от намагниченности.

**Fig. 3.** Dependences of the Faraday angle for the Fe (1), Co (2), Ni (3) films on PET substrates on magnetization.

Fe, Co, Ni с молекулярными группами полимерной подложки ПЭТ.

#### 4. ВЫВОДЫ

1. Двухслойные структуры Fe, Co, Ni/ПЭТ обладают значительным эффектом Фарадея, обусловленным магнитооптической активностью как металлической плёнки, так и полимерной подложки.
2. Экспериментальная зависимость угла Фарадея от толщины плёнки металла и намагничённости структур Fe, Co, Ni/ПЭТ отличается от теоретически предсказанной. Это может быть связано с взаимодействием между плёнками металла и молекулярными группами, входящими в состав полимера ПЭТ. Такое взаимодействие приводит к взаимному влиянию плёнки и полимерной подложки на магнитооптические свойства структур Fe, Co, Ni/ПЭТ.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. U. W. Pohl, *Epitaxy of Semiconductors: Introduction to Physical Principles* (Berlin–London: Springer: 2013).
2. <http://www.phoenixtechnologies.net/why-rpet/>
3. А. К. Звездин, В. А. Котов, *Магнитооптика тонких плёнок* (Москва: Наука: 1988), с. 26.
4. D. W. van Krevelen and K. te Nijenhuis, *Properties of Polymers* (Amsterdam: Elsevier Science: 2009).
5. К. О. Шаповал, А. М. Касумов, and G. V. Lashkarev, *International Conference on the Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems—ICPTTFN-XVI (15–20 травня 2017, Яремче)* (Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника: 2017), с. 246.

#### REFERENCES

1. U. W. Pohl, *Epitaxy of Semiconductors: Introduction to Physical Principles* (Berlin–London: Springer: 2013).
2. <http://www.phoenixtechnologies.net/why-rpet/>
3. A. K. Zvezdyn and V. A. Kotov, *Magnitooptika Tonkikh Plenok* (Moscow: Nauka: 1988), p. 26 (in Russian).
4. D. W. van Krevelen and K. te Nijenhuis, *Properties of Polymers* (Amsterdam: Elsevier Science: 2009).
5. K. O. Shapoval, A. M. Kasumov, and G. V. Lashkarev, *International Conference on the Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems—ICPTTFN-XVI (May 15–20, 2017, Yaremche)* (Vasyl Stefanyk Precarpathian National University: 2017), p. 246.