

УДК 537.632.5

## ОСОБЕННОСТИ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ БИСЛОЕВ NiFe-Та

© 2024 г. М. М. Яшин<sup>1, 2</sup>, А. Н. Юрасов<sup>1, \*</sup>, М. А. Симдянова<sup>3</sup>,  
И. В. Гладышев<sup>1</sup>, Т. Н. Бахвалова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

<sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Москва, Россия

\* E-mail: alexey\_yurasov@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.2024

После доработки 25.06.2024

Принята к публикации 31.07.2024

Обсуждаются результаты моделирования магнитооптических свойств наноразмерных слоистых структур на основе структуры пермаллоя-тантала на кремниевой подложке. Спектральные зависимости рассчитаны в экваториальной геометрии магнитооптического эффекта Керра (ТКЕ) в диапазоне 0.5–4.0 эВ, при этом установлено сильно нелинейное поведение спектров в зависимости от толщины слоя пермаллоя и тантала. Также показано, что эффект Керра может быть значительно усилен при достаточно больших значениях толщины слоя тантала.

DOI: 10.31857/S0367676524110289, EDN: FIZKQA

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение различных свойств перспективных наноструктур сегодня является весьма актуальным. В наноструктурах возможно усиление различных эффектов, например таких, как магнитосопротивление, аномальный эффект Холла, большая магнитооптическая активность и др. [1–3]. Примером таких систем служат слоистые наноразмерные структуры. Моделирование наблюдаемых оптических и магнитооптических эффектов позволяет бесконтактным способом оценивать различные характеристики параметры исследуемых образцов [4–6].

Целью настоящей работы является моделирование магнитооптических свойств слоистых наноразмерных структур на примере структуры пермаллоя (ферромагнетик) – тантала (парамагнетик) (NiFe-Та) на кремниевой подложке для рассмотрения возможности создания на их основе перспективных элементов электроники. Такое моделирование проводится впервые.

Рассматриваемые структуры могут быть использованы для повышения чувствительности биочипов [7, 8] или, например, для усиления сигнала Керра за счет взаимодействия световой волны с плазмонной волной в металле [9–12]. Отметим также, что

частично усиление ТКЕ может быть объяснено интерференционными эффектами.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При измерении ТКЕ в слоистых наноразмерных структурах пермаллоя-тантала (NiFe-Та) на кремниевой подложке с широкополосным источником света была обнаружена инверсия знака ТКЕ и увеличение амплитуды сигнала в слое ферромагнитного металла, модифицированного обычным металлом [13]. Сигнал может быть усилен в несколько раз, особенно для тонких ( $\leq 10$  нм толщиной) магнитных пленок. Магнитооптический сигнал наблюдался даже при увеличении толщины слоя Та до 130 нм [13].

Для того чтобы понять такое интересное поведение, было проведено моделирование ТКЕ при различных толщинах NiFe и Та для структуры NiFe-Та/Si.

В ферромагнетиках для изотропной среды диэлектрическая проницаемость представляется в виде тензора

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon & i\gamma & 0 \\ -i\gamma & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Стоит отметить, что диагональные компоненты  $\varepsilon$  отвечают за оптические свойства, а недиагональные  $\gamma$  за магнитооптические свойства наноструктур. На основании этого можно сделать вывод, что магнитооптические методы исследования позволяют получить более полную информацию об исследуемых структурах, чем оптические. Параметр ТКЕ, зависящий от частоты  $\omega$ , определяется следующим выражением [6]:

$$\rho_{\omega} = (A\gamma_1 + B\gamma_2) \frac{2\sin 2\phi}{A^2 + B^2} \quad (2)$$

где  $\phi$  — угол падения света,  $A = \varepsilon_2(2\varepsilon_1 \cos^2 \phi - 1)$ ,  $B = \cos^2 \phi(\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2 + 1) + \varepsilon_1 - 1$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$ ,  $\gamma = \gamma_1 - i\gamma_2$ .

По угловым зависимостям становится возможным через параметр ТКЕ при двух разных углах (индексы 1 и 2) вычислить значения  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  данного образца:

$$\begin{cases} \rho_{1\omega} = (A_1\gamma_1 + B_1\gamma_2) \frac{2\sin 2\phi_1}{A_1^2 + B_1^2}, \\ \rho_{2\omega} = (A_2\gamma_1 + B_2\gamma_2) \frac{2\sin 2\phi_2}{A_2^2 + B_2^2}. \end{cases}$$

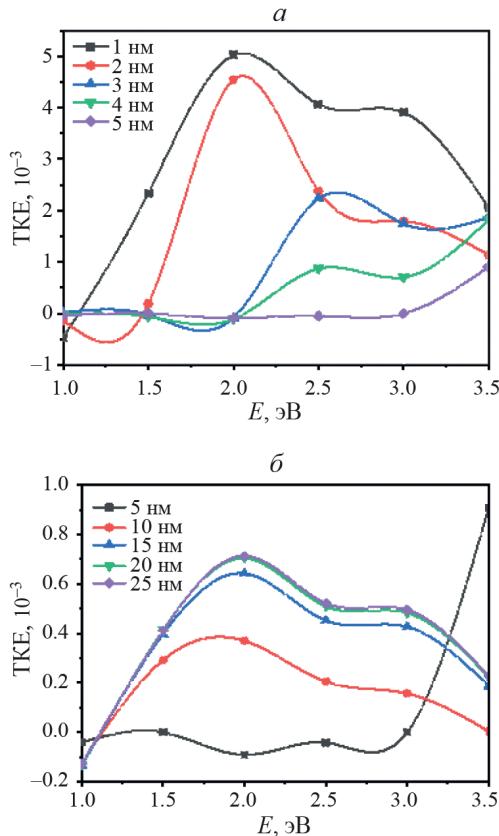


Рис. 1. Модельные спектральные зависимости ТКЕ слоистой структуры NiFe — Ta/Si при различной толщине слоя Та: от 1 до 5 нм (а); от 5 до 25 нм (б). Толщина NiFe составляет 150 нм.

Отсюда получаем окончательное выражение для  $\gamma_2$ :

$$\gamma_2 = \left( \frac{\rho_{2\omega}}{A_2} \frac{A_2^2 + B_2^2}{2\sin 2\phi_2} - \frac{\rho_{1\omega}}{A_1} \frac{A_1^2 + B_1^2}{2\sin 2\phi_1} \right) \left/ \left( \frac{B_2}{A_2} - \frac{B_1}{A_1} \right) \right., \quad (3)$$

а для  $\gamma_1$ :

$$\gamma_1 = \left( \frac{\rho_{2\omega}}{B_2} \frac{A_2^2 + B_2^2}{2\sin 2\phi_2} - \frac{\rho_{1\omega}}{B_1} \frac{A_1^2 + B_1^2}{2\sin 2\phi_1} \right) \left/ \left( \frac{A_2}{B_2} - \frac{A_1}{B_1} \right) \right.. \quad (4)$$

Полученные выражения (2)–(4) использовались для моделирования магнитооптических свойств рассматриваемых слоистых наноструктур на основе NiFe-Ta/Si.

Моделирование магнитооптических спектров проводилось согласно формулам Френеля для многослойных систем [15, 16]. При этом учитывались оптические и магнитооптические параметры для объемных NiFe и Та [13] при различных значениях толщины слоя Та (рис. 1 и 2) и при разных значениях толщины NiFe (рис. 3, 4).

Экспериментальные и рассчитанные спектры ТКЕ на рисунках 1–4 демонстрируют сложное поведение магнитооптического отклика в зависимости от толщины NiFe и Та. Установлено усиление параметра эффекта Керра в различных областях спектра

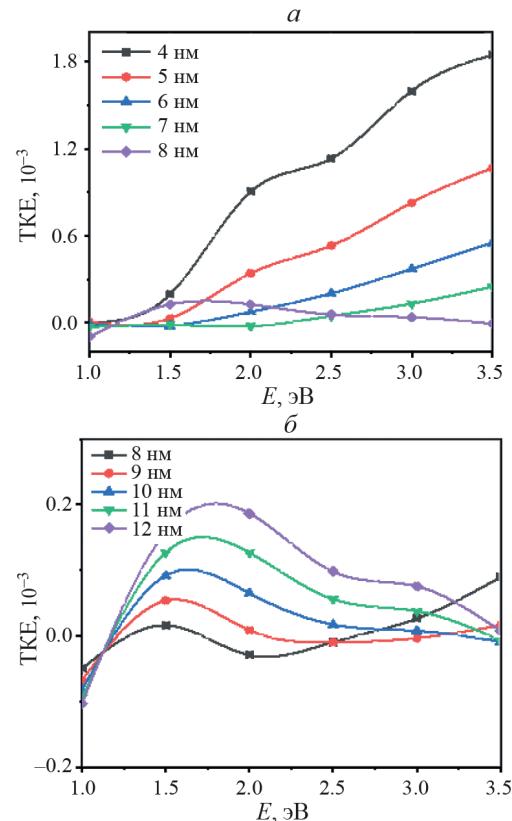


Рис. 2. Модельные спектральные зависимости ТКЕ слоистой структуры NiFe — Ta/Si при различной толщине слоя Та: от 4 до 8 нм (а); от 8 до 12 нм (б). Толщина NiFe составляет 30 нм.

и при различных значениях толщины слоя NiFe и Ta. Частично такое усиление может быть объяснено интерференционными эффектами. Важно отметить, что знак и величина эффекта Керра определяются наличием поляризованных (большинства и меньшинства со спинами по и против намагниченности) электронов ниже уровня Ферми и одновременно пустых состояний выше уровня Ферми.

При этом показано (рис. 1–3), что сигнал ЭЭК может быть значительно усилен для слоев Ta толщиной 10–25 нм. Наиболее вероятным механизмом преобразования эффекта Керра является диффузия невозбужденных поляризованных неосновных и основных электронов через двухслойную границу раздела из ферромагнитного металла. Однако данный факт, безусловно, требует дальнейшего исследования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, впервые представлены результаты моделирования магнитооптических исследований бислоев NiFe-Ta на примере экваториального эффекта Керра в спектральном диапазоне 0.5–4.0 эВ.

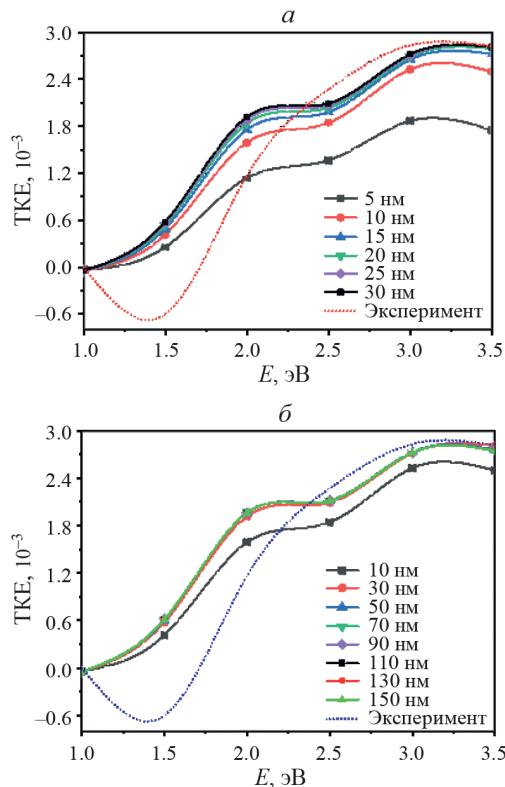


Рис. 3. Модельные спектральные зависимости ТКЕ слоистой структуры NiFe – Ta/Si (сплошная линия) при различной толщине слоя NiFe: от 5 до 30 нм (а); от 10 до 150 нм (б) в сравнении с экспериментом (точки). Толщина Ta составляет 3 нм.

Установлено сложное поведение спектров ЭЭК в зависимости от толщины NiFe и Ta, а также обнаружено увеличение ТКЕ при определенных значениях длины волны излучения и толщины слоя Ta. Частично такое усиление может быть объяснено интерференционными эффектами. Важно отметить, что возможном механизме трансформации эффекта Керра является диффузия на большие расстояния невозбужденных поляризованных электронов через двухслойную границу раздела, что требует дальнейшего исследования.

Показано, что сигнал ТКЕ может значительно усиливаться при значениях толщины слоя Ta 10–25 нм, что, несомненно, важно для создания новых типов перспективных устройств электроники. Результаты могут быть использованы также при проектировании и анализе многослойных спиновых структур и применении в магнитооптических и магнитоплазменных сенсорах [17–19].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание для вузов № ФСФЗ-2023-0005) и программы «Акселератор МИРЭА – Российский технологический университет».

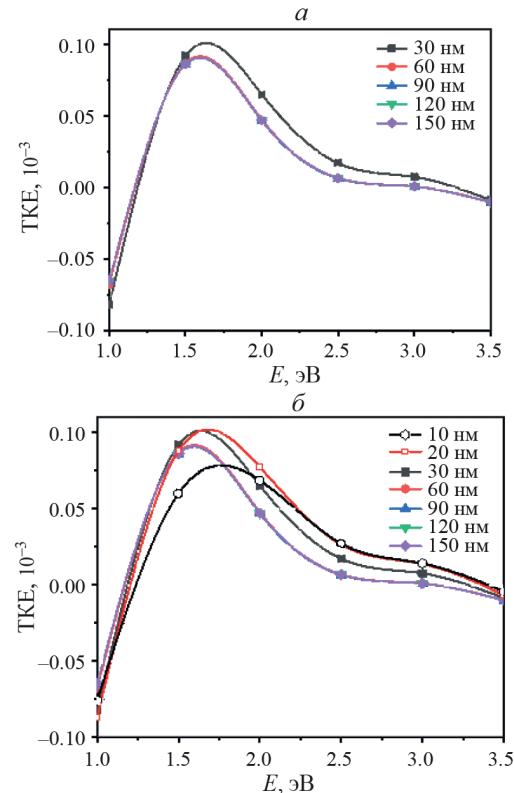


Рис. 4. Спектральные зависимости ТКЕ слоистой структуры NiFe – Ta/Si при различной толщине слоя NiFe: от 5 до 30 нм (а); от 10 до 150 нм (б). Толщина Ta составляет 10 нм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ганшина Е.А., Припеченков И.М., Перова Н.Н. и др. // Изв. РАН Сер. физ. 2023. Т. 87. № 3. С. 328; *Ganshina E.A., Pripechenkov I.M., Perova N.N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 3. P. 282.*
- Ганшина Е.А., Ващук М.В., Виноградов А.Н. и др. // ЖЭТФ. 2004. Т. 125. № 5. С. 1172; *Ganshina E.A., Vashuk M.V., Vinogradov A.N. et al. // JETP. 2004. V. 125. No. 5. P. 1172.*
- Николаев С.Н., Черноглазов К.Ю., Емельянов А.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 118. № 1-2(7). С. 46; *Nikolaev S.N., Chernoglazov K.Yu., Emelyanov A.V. et al. // JETP Lett. 2023. V. 118. No. 1. P. 58.*
- Юрасов А.Н., Яшин М.М., Гладышев И.В. и др. // РТЖ. 2021. Т. 9. № 3. С. 49.
- Юрасов А.Н., Яшин М.М., Гладышев И.В. и др. // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Ест. науки. 2023. № 5. С. 63.
- Трушин А.С., Кичин Г.А., Звездин К.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 1. С. 105; *Trushin A.S., Kichin G.A., Zvezdin K.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 1. P. 88.*
- Armelles G., Cebollada A., Garcia-Martin A. et al. // Adv. Opt. Mater. 2013. V. 1. No. 10. P. 10.
- Samarin S.N., Artamonov O.M., Baraban A.P. et al. // App. Phys. Lett. 2015. V. 107. Art. No. 101602.
- Safarov V.I., Kosobukin V.A., Hermann C. et al. // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. No. 26. P. 3584.
- Hermann C., Kosobukin V.A., Lampel G. et al. // Phys. Rev. B. 2001. V. 64. No. 23. Art. No. 235422.
- Loughran T.H.J., Keatley P.S., Hendry E. et al. // Opt. Express. 2018. V. 26. No. 4. P. 4738.
- Sapienza L., Zerulla D. // Phys. Rev. B. 2009. V. 79. No. 3. Art. No. 033407.
- Skidanov V.A. // In: Book of Abstracts EASTMAG 2022 (Kazan, 2022). Р. 1.
- Юрасов А.Н., Яшин М.М., Ганшина Е.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 5. С. 716; *Yurasov A.N., Yashin M.M., Ganshina E.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 5. P. 601.*
- Mayevsky V.M. // Fiz. Met. and Metalloved. 1985. V. 59. P. 213.
- Юрасов А.Н., Яшин М.М., Мирзокулов Х.Б. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 7. С. 969; *Yurasov A.N., Yashin M.M., Mirzokulov Kh.B. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 7. P. 884.*
- Ткачева В.Р. // Техника. Технологии. Инженерия. 2016. № 1. С. 37.
- Lima E., Tanaka T., Toyoda I.A. // PIER M. 2018. V. 75. P. 141.
- Пикалов А.М., Дорофеенко А.В., Грановский А.Б. // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 113. № 8. С. 527; *Pikalov A.M., Dorofenko A.V., Granovsky A.B. // JETP Lett. 2021. V. 113. No. 8. P. 521.*

## The peculiarities of magneto-optical spectra of NiFe-Ta bilayers

М. М. Яшин<sup>1, 2</sup>, А. Н. Юрасов<sup>1, \*</sup>, М. А. Симдянова<sup>3</sup>,  
И. В. Гладышев<sup>1</sup>, Т. Н. Бахвалова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia

\* e-mail: alexey\_yurasov@mail.ru

We presented the results of modeling the magneto-optical properties of nanoscale layered structures based on the permalloy-tantalum structure on a silicon substrate. The spectral dependences are calculated in the transverse geometry of the magneto-optical Kerr effect in the range of 0.5–4.0 eV, while a highly nonlinear behavior of the spectral dependences was established depending on the thickness of the permalloy and tantalum layer. It is also shown that the Kerr effect can be significantly enhanced with sufficiently large values of the thickness of the tantalum layer.