

УДК 538.958

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОРЕФРАКТИВНОГО ЭФФЕКТА В НАНОСТРУКТУРАХ

А.Н. Юрасов, д. ф.-м. н., профессор

*Кафедра наноэлектроники Физико-технологического института,
Московский технологический университет, Москва, 119454 Россия
@Автор для переписки, e-mail: alexey_yurasov@mail.ru*

Работа посвящена теоретическому исследованию магниторефрактивного эффекта (МРЭ) в наноструктурах, обсуждены возможные механизмы его усиления. Магниторефрактивный эффект представляет собой изменения коэффициентов отражения, прохождения и поглощения электромагнитных волн в образцах с магнитосопротивлением при приложении магнитного поля. Получены формулы для изменения коэффициентов рефракции и экстинкции в магнитном поле, позволяющие с большей степенью достоверности описывать спектры магниторефрактивного эффекта, особенно в ближней ИК-области спектра. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными. Показано, что величина и частотная зависимость МРЭ чувствительна к оптическим свойствам структур, их толщине и величине магнитосопротивления. Установлено, что изменение оптических параметров напрямую связано с магнитопроводимостью (магнитосопротивлением) в наноструктурах под действием магнитного поля. МРЭ может быть эффективно использован как бесконтактный метод измерения магнитосопротивления наноструктур.

Ключевые слова: магниторефрактивный эффект, наноструктуры, магнитосопротивление.

FEATURES OF THE MAGNETOREFRACTIVE EFFECT IN NANOSTRUCTURES

A.N. Yurasov

*Moscow Technological University, Moscow, 119454 Russia
@Corresponding author e-mail: alexey_yurasov@mail.ru*

We have theoretical investigated the magnetorefractive effect (MRE) in nanostructures. We discuss possibility of magnifications for this effect. MRE can be considered as variations of the coefficients of reflection, transmission and absorption of electromagnetic waves of samples with magnetoresistance (MR) under applied magnetic field. We have deduced formulas for change of the optical constants in magnetic field that does possibility for corrected description spectra of the magnetorefractive effect especially in the near IR region. The results of calculations have been analyzed in comparison with experimental date in the IR range. It was shown that the

magnitude and frequency dependencies of MRE are sensitive to the optical properties of the structures, model parameters, their thickness and MR values. It was shown that changes of the optical constants are strictly connected with the magnetoconductivity (magnetoresistance) of the nanostructures under applied magnetic field. So as MRE can be used as contactless method for MC measurements effectively.

Keywords: magnetorefractive effect, nanostructures, magnetoresistance.

Настоящая работа посвящена выявлению особенностей магниторефрактивного эффекта (МРЭ) в металлических многослойных пленочных наноструктурах, обладающих эффектом гигантского магнитосопротивления (ГМС) в относительно слабых магнитных полях.

В металлических наноструктурах проводимость $\sigma(\omega)$ значительно изменяется при намагничивании, и поэтому определяющая индексы рефракции диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(\omega)$

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_r(\omega) - i \frac{4\pi\sigma(\omega)}{\omega}, \quad (1)$$

линейно связанная с проводимостью $\sigma(\omega)$, также является функцией приложенного магнитного поля. Здесь ω – частота электромагнитного излучения, $\varepsilon_r(\omega)$ – диэлектрическая проницаемость, учитывающая вклад токов смещения.

Согласно [1], магниторефрактивный эффект определяется как изменение коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных волн для образцов с ГМС, туннельным магнитосопротивлением (ТМС) и колоссальным магнитосопротивлением (КМС) при намагничивании и проявляется наиболее ярко в ИК-области спектра, где внутризонные переходы играют доминирующую роль. Первоначально МРЭ рассматривался как изменение коэффициента рефракции (n) в магнитном поле. В настоящее время в связи с возросшим интересом к неоднородным магнитным материалам, к которым относятся и магнитные нанокompозиты и манганиты, а также в связи со сложностью определения коэффициентов рефракции и экстинкции (k) МРЭ определяют как изменение коэффициента отражения или прохождения в магнитном поле. МРЭ представляет собой высокочастотный аналог МС, и его важной особенностью является возможность применения в качестве бесконтактного метода исследования различных функциональных материалов, элементов микроэлектроники и сенсоров [1, 2].

Важно отметить, что результаты исследования МРЭ могут найти применение в различных сферах: для объяснения оптических и магнитооптических свойств систем металл–металл, металл–диэлектрик, ферромагнитный металл–полупроводник, гибридных мультислоев, многослойных магнитных систем и манганитов, для бесконтактного контроля твердотельных элементов памяти, сенсоров с магнитосопротивлением, а также для поиска новых материалов с повышенным оптическим и магнитооптическим откликом (см. [1], [2] и ссылки в этих статьях).

Вклад намагниченности образца в оптическую проводимость $\sigma(\omega)$ и, соответственно, в МРЭ учитывается посредством ее влияния на магнитосопротивление материала $\Delta\rho/\rho$ по

формуле:

$$\Delta\sigma = \frac{1}{\rho(0)} - \frac{1}{\rho(H)} = \frac{\Delta\rho}{\rho^2(0)[1 - \frac{\Delta\rho}{\rho(0)}]}, \quad (2)$$

где $\Delta\sigma$ – магнитопроводимость [2].

В случае тонких пленок все расчеты проводили по обобщенным формулам Френеля с учетом интерференции и поглощения [3] для многослойной системы; для трехслойной системы формулы представлены ниже:

$$R = |r_{jkl}^p|^2, r_{jkl}^p = \frac{r_{jk}^p + F_k^2 r_{kl}^p}{1 + F_k^2 r_{jk}^p r_{kl}^p}, r_{jk}^p = \frac{g_j n_k^2 - g_k n_j^2}{g_j n_k^2 + g_k n_j^2}, g_j = \sqrt{n_j^2 - n_1^2 \sin^2 \phi}, \quad (3)$$

$$F_k = \exp(-2\pi i \lambda^{-1} g_k d_k),$$

где n_j – комплексный показатель преломления среды, из которой на систему падает свет;

ϕ – угол падения света из первой среды;

j, k, l – номера сред;

d_k – толщина соответствующей среды;

λ – длина световой волны в вакууме;

i – мнимая единица.

Аналогичные формулы можно записать и для коэффициента прохождения света T [3]:

$$T = |t_{jkl}^p|^2, t_{jkl}^p = \frac{t_{jk}^p F_k t_{kl}^p}{1 + F_k^2 r_{jk}^p r_{kl}^p}, \quad (4)$$

$$F_k = \exp(-2\pi i \lambda^{-1} g_k d_k),$$

Следует подчеркнуть, что для многослойной системы можно получить аналогичные рекуррентные формулы [3].

Как показано в [4], вклад недиагональных компонент тензора диэлектрической проницаемости для магнитного металла в фарадеевской геометрии эксперимента в ИК-области спектра не существен, и наблюдаемые изменения определяются только вкладом диагональных компонент эффективной среды из магнитного и немагнитного металла. Таким образом, МРЭ линейно связан с магнитосопротивлением.

Магниторефрактивный эффект на отражение и прохождение света рассчитывали по следующим формулам:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)}, \quad \frac{\Delta T}{T} = \left| \frac{T(H) - T(0)}{T(0)} \right|, \quad (5)$$

где $R(H,0)$, $T(H,0)$ – коэффициенты отражения и пропускания света образцом в магнитном поле и без поля, соответственно.

Важной задачей при расчете МРЭ в металлической многослойной наноструктуре является правильный расчет коэффициентов отражения и прохождения света в магнитном поле. Для этого в формуле (1) выделяется действительная и мнимая части $\varepsilon_1 = n^2 - k^2$ и $\varepsilon_2 = 2nk$. В магнитном поле коэффициент рефракции n и коэффициент экстинкции k изменяются, соответственно, на Δn и Δk . Подставив их в ε_1 и ε_2 и приравняв их к соответствующим выражениям из формулы (1), пренебрегая произведением $\Delta n \Delta k$ как величиной второго порядка малости, окончательно получим формулы для Δn и Δk и их связь с изменением магнитопроводимости, а значит, и магнитосопротивлением, по формуле (2):

$$\Delta n = \frac{2\pi\Delta\sigma}{\omega} \left(\frac{n+k}{n^2+k^2} \right), \quad \Delta k = \frac{2\pi\Delta\sigma}{\omega} \left(\frac{n-k}{n^2+k^2} \right). \quad (6)$$

Формулы (6) являются одним из важнейших результатов данной работы.

Подставляя полученные значения в формулы (3) и (5), рассчитываем МРЭ. Результаты расчета для многослойной системы $\text{Co}/\text{Au}(\text{Au}(3\text{nm}))/\text{Co}(2\text{nm})/(\text{Au}(3\text{nm}))_n$ приведены на рис. 1. В соответствии с расчетами, величина эффекта на отражении значительно меняется в ближней ИК-области спектра – как по форме, так и по знаку. Указанное обстоятельство связано с наличием интерференции (изменение условий для нее при изменении числа слоев), спин-зависимым рассеянием, а также проявлением размерных эффектов [5–7].

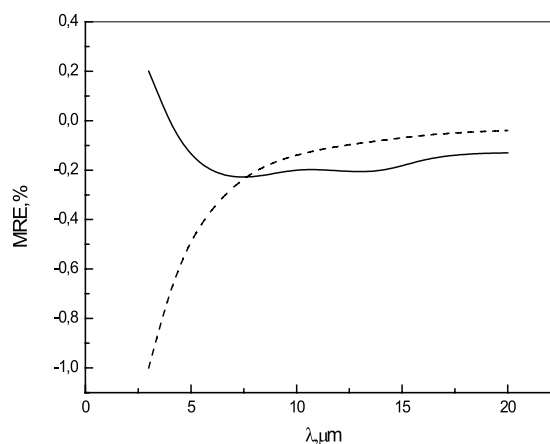


Рис. 1. Рассчитанные спектры магниторефрактивного эффекта на отражении для системы $\text{Co}/\text{Au}(\text{Au}(3\text{nm}))/\text{Co}(2\text{nm})/(\text{Au}(3\text{nm}))_n$, состоящей из $n=10$ слоев (пунктир) и из $n=2$ слоев (сплошная линия).

На рис. 2 приведен расчетный спектр МРЭ на отражении для многослойной структуры феррита с медью разной толщины. Важно отметить, что, как видно из рис. 2, величина эффекта значительно увеличивается не только с ростом магнитосопротивления, но и с ростом числа мультислоев.

На рис. 3 представлено сравнение рассчитанных спектров МРЭ на пропускание света для структуры феррита с медью. Экспериментальные данные здесь получены с ис-

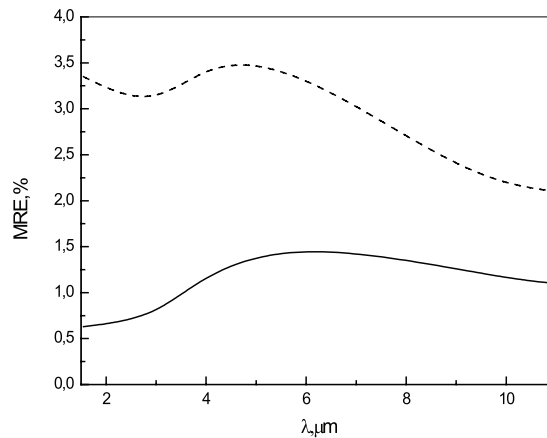


Рис. 2. Рассчитанные спектры магнитофрактивного эффекта на отражении для многослойной структуры феррита с медью: пунктир соответствует увеличению числа слоев в 2 раза по сравнению со сплошной линией.

пользованием методики, описанной в [8]. Видно, что расчетные и экспериментальные данные находятся в хорошем качественном и даже количественном согласии. По нашему мнению, отличие спектров связано, в первую очередь, с необходимостью учета распределения по размерам металлических частиц, а также рассеяния на интерфейсах [2, 5]. Учет распределения по размерам металлических частиц является сложной задачей, требующей нахождения правильного распределения для конкретной наноструктуры [5]. Спин-зависящее рассеяние будет рассмотрено ниже.

Для структур, содержащих большое количество разных слоев, формулы (3) могут быть обобщены аналогично [3], и получены следующие обобщенные рекуррентные формулы с учетом каждого слоя структуры:

$$R = |r_{m,n+1}|^2, r_{m,n+1} = \frac{r_{m,m+1} + F_{m+1}^2 r_{m+1,n+1}}{1 + F_{m+1}^2 r_{m,m+1} r_{m+1,n+1}}, r_{m,m+1} = \frac{g_m n_{m+1}^2 - g_{m+1} n_m^2}{g_m n_{m+1}^2 + g_{m+1} n_m^2}, g_m = \sqrt{n_m^2 - n_1^2 \sin^2 \phi},$$

$$F_{m+1} = \exp(-2\pi i \lambda^{-1} g_{m+1} d_{m+1}),$$
(7)

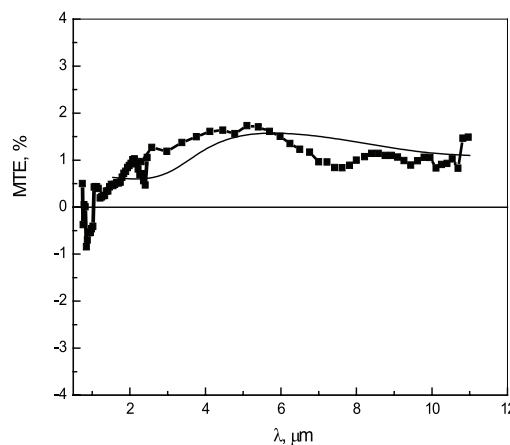


Рис. 3. Спектры магнитофрактивного эффекта на прохождение для многослойной структуры феррита с медью: теория (сплошная линия) и эксперимент (символы) [8].

где m – номер слоя, из которого падает свет;
 $n+1$ – номер слоя, в который свет выходит из образца (из всей многослойной структуры).
 Аналогично рассчитывается пропускание света T :

$$T = |t_{m,n+1}|^2, t_{m,n+1} = \frac{t_{m,m+1} F_{m+1} t_{m+1,n+1}}{1 + F_{m+1}^2 r_{m,m+1} r_{m+1,n+1}}. \quad (8)$$

Проведенные для структуры $\text{Co}/\text{Au}(\text{Au}(3\text{nm}))/\text{Co}(2\text{nm})/(\text{Au}(3\text{nm}))_n$ расчеты показали, что полученные по формулам (3) и (7) результаты близки. Это закономерно, так как подобная наноструктура удовлетворяет условию эффективной среды, следовательно, с достаточной степенью точности все слои можно рассматривать в виде единого эффективного слоя. Для учета спин-зависящего рассеяния в подобных структурах [9] удобно рассмотреть выражение для диэлектрической проницаемости в пределе самоусреднения [10]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{st} + \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \frac{i\omega\tau}{1 - i\omega\tau} \left(1 + \frac{m^2 \beta^2}{(1 - i\omega\tau)^2 - m^2 \beta^2}\right) \quad (9)$$

где m – относительная величина намагниченности M/M_s ;
 β – параметр спиновой асимметрии.

Параметры выбирали таким образом, чтобы они соответствовали имеющимся оптическим данным: $\varepsilon_{st} = 3.5$, что отвечает модифицированной модели Друде для соединений рассматриваемого типа в ИК-области спектра [10]. Используя формулу (8) и сравнивая ее с (1), можно рассчитать магнитопроводимость наноструктуры как:

$$\Delta\sigma = \frac{\omega}{4\pi} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \frac{\omega\tau}{1 - i\omega\tau} \frac{m^2 \beta^2}{(1 - i\omega\tau)^2 - m^2 \beta^2} \quad (10)$$

Затем по формулам (5), (3) и (4) можно рассчитать МРЭ как на отражение, так и на пропускание света с учетом спин-зависящего рассеяния. Только учитывая спин-зависящее рассеяние, можно получить изменение знака эффекта на рис. 3 на границе видимой и ИК-области спектра.

Подытоживая выше изложенное подчеркнем, что в работе получены формулы изменения коэффициентов рефракции и экстинкции в магнитном поле, которые использованы для расчета МРЭ в металлических магнитных многослойных наноструктурах.

Рассчитаны спектры магниторефрактивного эффекта на отражении (магнитоотражение) и пропускании (магнитопропускание) света для металлической многослойной наноструктуры $\text{Co}/\text{Au}(\text{Au}(3\text{nm}))/\text{Co}(2\text{nm})/(\text{Au}(3\text{nm}))_n$. Показано, что величина и вид спектральной зависимости магниторефрактивного эффекта для наноструктур зависят от величины магнитосопротивления (магнитопроводимости), оптических свойств (поглощения) полученных пленок и параметров слоев (количество и толщина) в многослойных системах.

Расчеты для металлических наноструктур показали, что, наряду с толщиной, боль-

шое влияние на величину и спектральную зависимость магнитопропускания и магнитоотражения оказывает эффективное время релаксации, плазменная частота и параметр спиновой асимметрии.

Описаны изменения коэффициентов рефракции и экстинкции слоев наноструктуры в магнитном поле. Показано, что главный вклад в изменение этих оптических параметров прямо пропорционален магнитопроводимости структуры. Учет спин-зависящего рассеяния на интерфейсах позволяет описать полученную экспериментально смену знака МРЭ.

Расчетные спектры МРЭ хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Линейная зависимость между МРЭ и МС позволяет использовать МРЭ в качестве бесконтактного метода контроля качества и измерения магнитосопротивления любых элементов электроники.

В заключение важно акцентировать внимание на разнообразии применений МРЭ и спектр решаемых задач:

- исследование структуры различных магнитных материалов;
- поиск новых перспективных материалов с заданными свойствами;
- разработка методов оптической спектроскопии;
- интерпретация экспериментальных результатов.

Магниторефрактивный эффект вносит вклад в решение фундаментальной задачи описания взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. Полученные для металлических наноструктур результаты однозначно свидетельствуют о широких возможностях применения МРЭ в качестве бесконтактного метода измерения МС.

Литература:

1. Telegin A.V., Sukhorukov Yu.P., Loshkareva N.N., Mostovshchikiva E.V., Bebenin, E.A. Gan'shina N.G., Granovsky A.B. Giant magnetotransmission and magnetoreflexion in ferromagnetic materials // *J. Magn. Magnet. Materials*. 2015. V. 383. P. 104–109.

2. Устинов В.В., Сухоруков Ю.П., Миляев М.А., Грановский А.Б., Юрасов А.Н., Ганьшина Е.А., Телегин А.В. Магнитопропускание и магнитоотражение в многослойных наноструктурах FeCr // *Журн. эксперим. и теор. физики*. 2009. Т. 135. Вып. 2. С. 293–300.

3. Маевский В.М. Теория магнетооптических эффектов в многослойных системах с произвольной ориентацией намагниченности // *Физика металлов и металловедение*. 1985. Т. 59. С. 213–216.

4. Грановский А., Быков И., Ганьшина Е., Гущин В., Козлов А., Юрасов А., Калинин Ю., Инуе М. Магниторефрактивный эффект в магнитных нанокompозитах // *Журн. эксперим. и теор. физики*. 2003. Т. 123. Вып. 6. С. 1256–1265.

5. Юрасов А.Н. О распределении по размерам гранул в нанокompозитах // *Российский технологический журнал*. 2016. Т. 4. № 1(10). С. 25–27.

6. Буравцова В.Е., Ганьшина Е.А., Дмитриев А.А., Иванова О.С., Калинин Ю.Е., Ситников А.В. // *Известия Академии наук. Сер. физическая*. 2009. Т. 73. № 9. С. 1374–1376.

7. Buravtsova V., Gan'shina E., Lebedeva E., Syr'ev N., Trofimenko I., Vyzulin S., Shipkova I., Phonghirun S., Kalinin Yu., Sitnikov A. // *Solid State Phenomena*. 2011. V. 168-169. P. 533–536.

8. Granovsky A., Sukhorukov Yu., Gan'shina E., Telegin A., Magnetorefractive effect in

magnetoresistive materials / in: M. Inoue, M. Levy, A.V. Baryshev (Eds.), Magnetophotonics: From Theory to Applications. Magnetophotonics, Springer Series in Materials Science 178, Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 107–133.

9. Банникова Н.С., Миляев М.А., Наумова Л.И., Проглядо В.В., Криницина Т.П., Каменский И.Ю., Устинов В.В. Гигантское магнитосопротивление сверхрешеток CoFe/Cu с буферным слоем $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ // Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116. С. 1040–1047.

10. Camplin J.P., Thompson S.M., Loraine D.R. [et al.] Contactless measurement of giant magnetoresistance in thin films by infrared reflection // J. Appl. Physics. 2000. V. 87. P. 4846–4848.