

УДК 537.632

INFLUENCE OF THE MAIN MEDIUM PARAMETERS ON THE
MAGNETO-OPTICAL SPECTRA IN THE BRUGGEMAN
APPROXIMATION

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ НА МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ
СПЕКТРЫ НАНОКОМПОЗИТОВ В ПРИБЛИЖЕНИИ БРУГГЕМАНА

Gladyshev I.V. / Гладышев И.В.

c.p.-m.s., as.prof. / к.ф.-м.н., доц.

ORCID: 0000-0002-7627-4978

Safin K.R. / Сафин К.Р.

student / студент

Filimonov V.V. / Филимонов В.В.

lecturer / преподаватель

Yurasov A.N. / Юрасов А.Н.

d.p.-m.s., as.prof. / д.ф.-м.н., доц.

ORCID: 0000-0002-9104-3529

Аннотация. В работе рассматриваются наноконпозиты диэлектрик-ферромагнитный металл, которые имеют сильный оптический и магнитооптический отклик. Исследована зависимость магнитооптических спектров от ряда параметров. Установлена наибольшая зависимость от изменения значений скорости Ферми.

Ключевые слова: наноконпозиты, магнитооптические спектры, приближение Бруггемана, скорость Ферми.

Abstract. The paper considers dielectric-ferromagnetic metal nanocomposites, which have a strong optical and magneto-optical response. The dependence of the magneto-optical spectra on a number of parameters was investigated. The greatest dependence on changes in the Fermi velocity values was established.

Key words: nanocomposites, magneto-optical spectra, Bruggeman approximation, Fermi velocity.

В настоящей работе рассматриваются наноконпозиты диэлектрик-ферромагнитный металл, которые имеют сильный оптический и магнитооптический отклик, и поэтому для исследования их свойств можно

использовать оптические или магнитооптические явления, например, экваториальный эффект Керра, позволяющий учесть как оптическую, так и магнитооптическую составляющие тензора диэлектрической проницаемости (ТДП). Сам ТДП имеет вид:

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

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, $\gamma = \varepsilon Q$, Q – магнитооптический параметр, зависящий от намагниченности среды.

Изменение интенсивности света на р-компоненте для экваториального эффекта Керра описывается формулой

$$\delta_p = \frac{2\sin 2\varphi}{A^2 + B^2} (A\gamma_1 + B\gamma_2), \quad (2)$$

где φ – угол падения света;

$$A = \varepsilon_2 (2\varepsilon_1 \cos^2 \varphi - 1);$$

$$B = \cos^2 \varphi (\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2 + 1) + \varepsilon_1 - 1;$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2;$$

$$\gamma = \gamma_1 - i\gamma_2.$$

Поскольку нанокompозиты многокомпонентны и многофазны, необходимо использовать приближения для получения возможности расчета и изучения свойств материала. Превосходными кандидатами в таком случае являются приближения эффективной среды, в рамках которых весь материал заменяется на однородную среду с эффективными свойствами. В данной работе использовалось приближение Бруггемана, которое хорошо работает при средних концентрациях компонент.

Форма спектра зависит от набора различных параметров, в числе которых скорость Ферми v_F , длина свободного пробега l , плазменная частота ω_p , намагниченность насыщения M_s , удельное сопротивление металла ρ_{bulk} ,

зависящие от состава нанокompозита. Также, параметрами являются коэффициент аномального эффекта Холла массивного образца R_{bulk} , отношение $\frac{R_{bulk}}{R_S}$, форм-фактор L .

Методика изучения влияния параметров заключается в следующих шагах:

1. Нахождение оптимального набора параметров путем построения магнитооптических спектров с различными параметрами, варьирующимися с заданным шагом и последующего их сравнения с экспериментальным спектром.
2. Построение магнитооптических спектров на основе наборов параметров, где варьируется один выбранный параметр с некоторым шагом (т.н. сечения).
3. Сравнение построенных на предыдущем шаге спектров с оптимальным спектром.
4. Построение зависимости отклонения спектров относительно оптимального от величины варьируемого параметра.

Нахождение оптимального спектра проводилось с помощью метода наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \rightarrow \min,$$

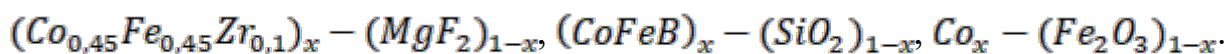
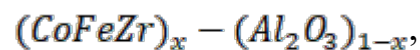
где n – количество точек спектра, y_i – значение экваториального эффекта Керра для экспериментального спектра в точке x_i , $f(x_i)$ – значение экваториального эффекта Керра для смоделированного спектра в точке x_i .

При построении зависимостей на шаге 4 в качестве оси Y использовалось стандартное отклонение для разности значений спектров:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left[|y_i - f(x_i)| - \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - f(x_i)|}{n} \right]^2}, \quad (3)$$

После построения зависимостей проводился анализ полученных результатов и определялись общие закономерности изменения магнитооптических спектров при варьировании параметров.

В качестве рассматриваемых образцов использовались тонкие нанокompозитные пленки с объемной долей металла от 0,09 до 0,34 и различным составом:



Результаты

Как показывают результаты, полученные при моделировании всех составов при различных концентрациях металлических гранул, основными и явными закономерностями являются:

1. Понижение удельного сопротивления металла ρ_{bulk} до значений порядка 10^{-8} Ом·м влечет за собой колоссальный рост стандартного отклонения σ до значений порядка десятых долей и единиц (при оптимальном значении $\sigma_{opt} = 10^{-4} - 10^{-3}$).

2. Увеличение плазменной частоты ω_p вызывает изменение стандартного отклонения σ в пределах от 10^{-4} (при оптимальном $\sigma_{opt} = 10^{-5}$) – 10^{-1} (при оптимальном $\sigma_{opt} = 10^{-4}$).

3. При уменьшении (при $x < 0,3$) или увеличении (при $x \geq 0,3$) фактора L стандартное отклонение σ достигает величин порядка 10^{-2} (при оптимальном значении $\sigma_{opt} = 10^{-4} - 10^{-3}$).

Поскольку при использовании приближения Бруггемана для моделирования магнитооптических спектров применяются параметры, которые не могут быть определены экспериментально с высокой точностью для конкретного образца (в частности, из-за разброса по величине). Поэтому величины данных параметров определяются путем варьирования вблизи известных из литературных источников характерных значений. Критерием «качества» подбора является среднеквадратичное (или стандартное) отклонение рассчитанного спектра от экспериментально измеренного, используемое также

как показатель влияния параметров на магнитооптический спектр в данной работе.

На рисунке 1 приведены графики зависимости величины стандартного отклонения рассчитанных спектров (по отношению к минимально достигнутой) от отношения варьируемого параметра к оптимальному для следующих параметров: скорость Ферми (на графике – v_F), коэффициент аномального эффекта Холла (на графике – AHE), отношения $\frac{R_s}{R_{bulk}}$. Разброс значений для различных образцов (т.е., составов и концентраций) выражен на рисунке в виде доверительных интервалов.

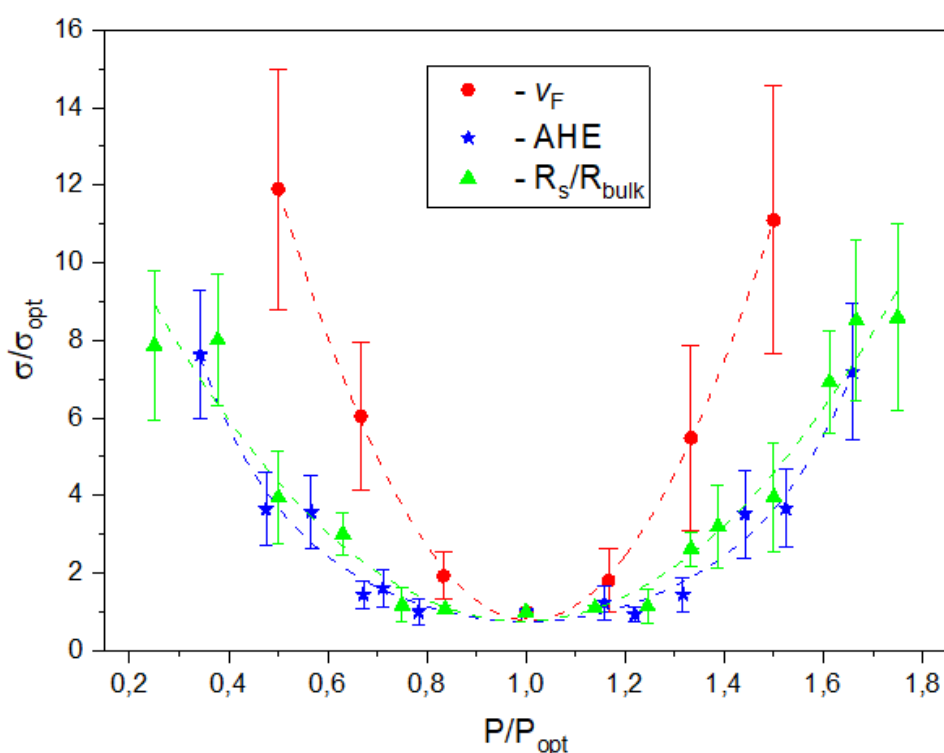


Рисунок 1 – Графики зависимости стандартного отклонения σ (по отношению к оптимальному σ_{opt}) от варьируемого параметра P (по отношению к оптимальному P_{opt}) для скорости Ферми v_F (красный цвет), коэффициента аномального эффекта Холла AHE (синий цвет), отношения

$$\frac{R_s}{R_{bulk}} \text{ (зеленый цвет).}$$

Авторская разработка.

Как видно из графиков, во всех случаях (т.е. с учетом различных объемных долей металла и составов в виде погрешности) наибольшая чувствительность наблюдается в отношении к изменению значений скорости Ферми, что связано, в-первую очередь с интенсивностью рассеяния электронов на поверхностях ферромагнитных гранул.

Литература:

1. *А.Н. Юрасов и др.* Влияние размерных эффектов и распределения гранул по размерам на оптические и магнитооптические свойства нанокompозитов // Российский технологический журнал. – 2021. – Т.9, №3. – С. 49 – 57.
2. *Bruggeman D.A.G* Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen // *Annalen der Physik.* – 1935. – Vol. 24, №8. – P.665 – 679.
3. *Юрасов А.Н., Грановский Н.В.* Экваториальный эффект Керра и учет размерного фактора в нанокompозитах на примере CoFeB // Российский технологический журнал. – 2018. – Т.6, №5. – С. 15 – 24.
4. *Юрасов А.Н., Яшин М.М.* Методы эффективной среды как оптимальные методы моделирования физических свойств наноструктур // Российский технологический журнал. – 2020. – Т.8, №5. – С. 68 – 77.
5. *Сафин К.Р., Гладышев И.В., Юрасов А.Н.* Определение степени влияния параметров на изменение магнитооптического спектра нанокompозитов в приближении Бруггемана // Оптотех-2021 (Москва, 16-17 дек. 2021 г.).

Научный руководитель: д.ф.-м.н., доц. Юрасов А.Н.

© Филимонов В.В.