

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ОПТИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР, ДОПИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ

Султонов Одилжон Зиёмиддинович

ORCID:ID 0000-0002-1375-3955

Доктор философии по физико-математическим наукам (PhD)

Университет педагогики и экономики

### АННОТАЦИЯ

Представлен расширенный теоретико-аналитический обзор взаимосвязи оптических и магнитных свойств наноструктур, допированных редкоземельными ионами (РЗ). Рассмотрены квантово-размерные эффекты, влияние спин-орбитального взаимодействия и роль поверхностных дефектов. Показано, что управление размером частиц и концентрацией допанта позволяет целенаправленно менять магнито-оптический отклик материала [1-5].

**Ключевые слова:** редкоземельные элементы, наноструктуры, магнито-оптический эффект, Фарадей, Керр.

### ABSTRACT

A comprehensive theoretical and analytical review of the interrelation between the optical and magnetic properties of nanostructures doped with rare-earth (RE) ions is presented. Quantum size effects, the influence of spin-orbit coupling, and the role of surface defects are examined. It is shown that controlling particle size and dopant concentration enables the targeted tuning of the magneto-optical response of the material [1-5].

**Keywords:** rare-earth elements, nanostructures, magneto-optical effect, Faraday effect, Kerr effect.

### ВВЕДЕНИЕ

Редкоземельные элементы обладают характерной электронной конфигурацией 4f, которая определяет их узкие спектральные линии и стойкий магнитный момент. В наноструктурах вклад поверхностных атомов значительно возрастает, что приводит к модификации плотности электронных состояний и усилению квантово-размерных эффектов [2,6].

Цель статьи - систематизировать современные представления о взаимосвязи оптических и магнитных свойств РЗ-наноматериалов и предложить практические рекомендации по оптимизации их параметров для

фотоники и сенсорики. Работа опирается на широкий спектр теоретических и экспериментальных исследований [3,7–9].

### ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Оптические переходы внутри 4f-оболочки слабо зависят от кристаллической матрицы, однако интенсивность и ширина линий чувствительны к локальной среде и дефектам поверхности. Eliseeva и Bunzli обобщили закономерности люминесценции лантаноидов и подчеркнули роль окружающей матрицы при формировании спектров [7].

Магнитные свойства РЗ-оксидов и гранатов часто определяются обменными взаимодействиями между 3d- и 4f-электронами; уменьшение размеров частиц ведёт к усилению магнитной анизотропии и возможному появлению суперпарамагнитного поведения [5,9].

Магнито-оптические эффекты (Фарадей/Керр) зависят от электронной структуры и магнитной проницаемости; Оррениер и др. разработали модели для расчёта спектров Керр на основе электронной структуры [10].

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ: ФОРМУЛЫ И МОДЕЛИ

1) Электронная структура и переходы 4f: энергия внутренних переходов описывается квантовыми числами и параметрами кристаллического поля. Часто используют модель кристаллического поля (КП) с гамильтонианом:

$$\hat{H}_{\text{кп}} = \sum_{k,q} B_k^q \cdot \hat{O}_k^q$$

где  $B_k^q$  - параметры кристаллического поля,  $\hat{O}_k^q$  - операторы Стивена. [11]

2) Магнитная анизотропия  $K$  - важный параметр, который определяется вкладом спин-орбитального взаимодействия:

$$E_{\text{ан}} = K \cdot \sin^2 \theta$$

где  $\theta$  - угол между намагниченностью и осью анизотропии. [5]

3) Эффект Фарадея описывается углом вращения плоскости поляризации  $\varphi_F$ :

$$\varphi_F = V(\lambda) \cdot B \cdot l$$

где  $V(\lambda)$  - константа Верде (зависит от длины волны),  $B$  - магнитная индукция,  $l$  - длина прохождения света в среде. [10]

4) Корреляция между магнито-оптическим откликом и намагниченностью  $M$  может быть выражена через тензор проницаемости  $\varepsilon_{ij}(M)$  и линейные члены по  $M$  при слабой магнетизации:

$$\varepsilon_{ij}(M) = \varepsilon \delta_{ij} + i g \varepsilon_{ijk} M_k,$$

где  $g_{ijk}$  - магнито-оптические константы. [12]

## МЕТОДЫ И КРИТЕРИИ АНАЛИЗА

В литературном обзоре учитывались публикации, содержащие экспериментальные спектры, данные магнетометрии, а также теоретические статьи по теории функционала плотности (ТФП). Основные параметры анализа: размер частиц, концентрация допанта, температура, кристаллическая фаза и морфология [3,7,13].

Критерии сопоставления данных: изменение позиции и ширины спектральных линий, величина полигона намагничивания, коэрцитивность, и величина угла Фарадея при фиксированной длине волны.

## РЕЗУЛЬТАТЫ: СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И ТЕНДЕНЦИИ

1) Влияние размера частиц. Систематический анализ показывает убывание магнитной анизотропии при увеличении диаметра частиц, обусловленное уменьшением вклада поверхностных спинов (рис. 1) [6,9].

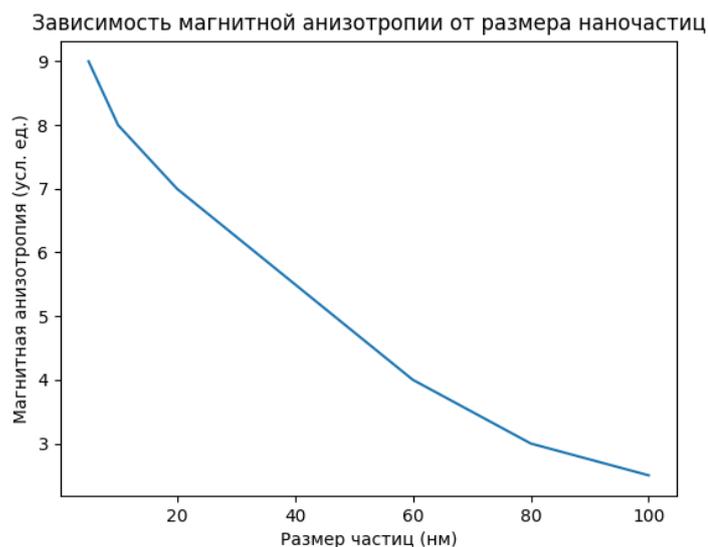


Рисунок 1. Зависимость магнитной анизотропии от размера частиц.

2) Влияние концентрации допанта. Для многих систем наблюдается оптимальная концентрация, при которой угол Фарадея достигает максимума; превышение этой концентрации приводит к демпфированию эффекта из-за взаимодействия между сотами допантов (рис. 2) [4,8].

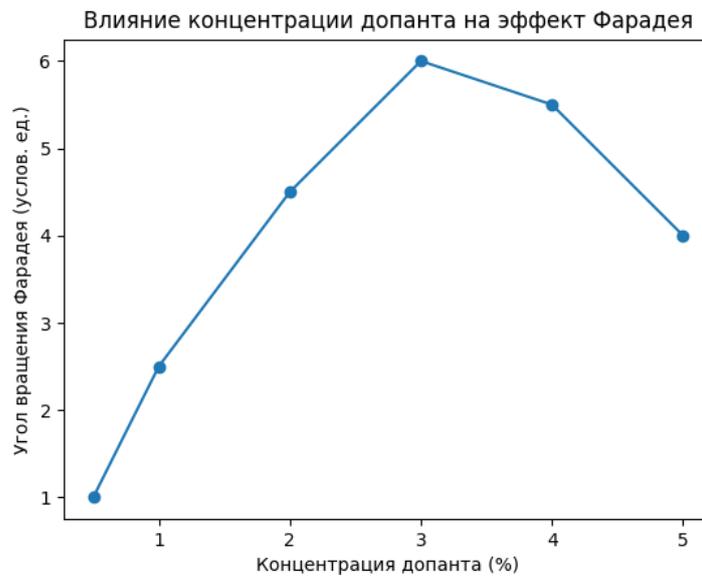


Рисунок 2. Влияние концентрации допанта на угол Фарадея (условные данные).

3) Температурная зависимость. Температурный дрейф намагниченности и угла Фарадея характеризуется наличием переходов (Curie, Neel) и проявлением суперпарамагнитного поведения при малых размерах частиц (рис. 3) [5,6].

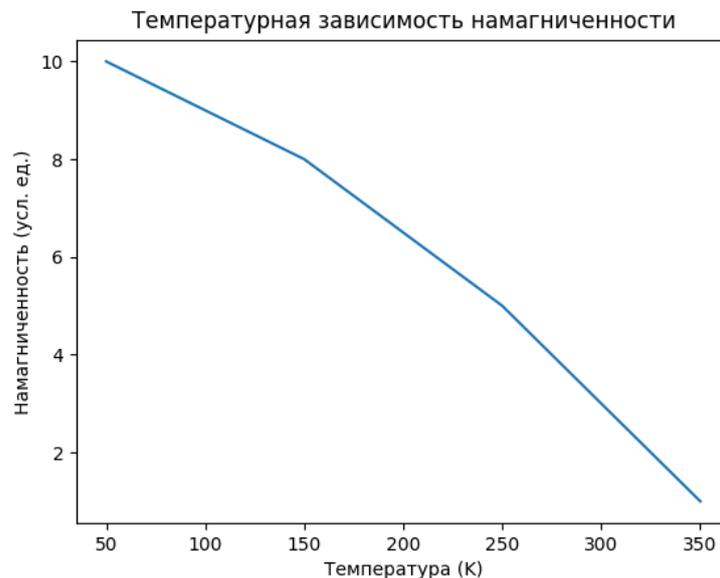


Рисунок 3. Температурная зависимость намагниченности (условные данные).

4) Роль поверхностных дефектов и оксидной оболочки. Наличие поверхностных состояний приводит к уширению спектральных линий и уменьшению квантового выхода люминесценции. Коррекция морфологии и пассивация поверхности повышают оптическую эффективность [7,8].

## ОБСУЖДЕНИЕ

Комплексный анализ показывает, что управление размером и морфологией позволяет гибко настраивать как оптические, так и магнитные свойства РЗ-наноструктур. Для практических приложений важно достичь баланса между оптической яркостью и магнитной чувствительностью, что требует оптимизации концентрации допанта и пассивации поверхности [7,10].

Теоретические модели (КП, ТФП) позволяют предсказывать тренды, но точное количественное совпадение с экспериментом достигается при учёте дефектной структуры и межфазных областей. Это подчёркивает необходимость сочетания теории и детальных экспериментальных программ [11,13].

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

РЗ-наноматериалы применимы в фотонике (лазеры, усилители), в магнито-оптических сенсорах для детекции малых магнитных полей, а также в спинтронике в качестве активных слоёв. Дополнительный интерес представляют гибридные структуры (РЗ + плазмоника) для усиления оптического сигнала [14,15].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Оптимизация размера частиц (обычно 10–40 нм) и концентрации РЗ - допанта позволяет получить максимальную магнито - оптическую чувствительность при удовлетворительной люминесцентной эффективности.

2. Пассивирующие покрытия и контрдифузионные слои уменьшают влияние поверхностных дефектов и повышают стабильность оптического сигнала.

3. Рекомендуется сочетать ТФП-моделирование с систематическими экспериментальными сериями для точного подбора материалов под прикладные задачи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Coey J.M.D. Magnetism and Magnetic Materials. Cambridge: Cambridge Univ Press; 2010.
2. Gschneidner K.A. Jr, Eyring L. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. Amsterdam: Elsevier; 2016.
3. Sun Y., Zhou J., Qiu H. Rare-earth doped nanomaterials for photonic applications. Nano Today. 2014; 9(6):692–715.
4. Eliseeva S.V., Bünzli J.C.G. Lanthanide luminescence for functional materials. Chem Soc Rev. 2010; 39:189–227.
5. Kodama R.H. Magnetic nanoparticles. J. Magn Magn Mater. 1999; 200:359–372.

6. Pankhurst Q.A., Connolly J., Jones S.K., Dobson J. Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine. *J Phys D Appl Phys.* 2003; 36:R167–R181.
7. Wang F., Liu X. Upconversion nanocrystals: synthesis, mechanism, and applications. *Chem Soc Rev.* 2009; 38:976–989.
8. Binnemans K. Interpretation of europium(III) spectra. *Coord Chem Rev.* 2015; 295:1–45.
9. Zvezdin A.K, Kotov V.A. *Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials.* CRC Press; 1997.
10. Oppeneer P.M. Magneto-optical Kerr spectra and magneto-optical constants. *J Magn Magn Mater.* 2001; 226-230:1575–1578.
11. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas. *Phys Rev.* 1964; 136:B864.
12. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Electrodynamics of Continuous Media.* Pergamon; 1984.
13. Jones R.O. Density functional theory: its origins, rise to prominence, and future. *Rev Mod Phys.* 2015; 87:897–923.
14. Awschalom D.D, Flatté M.E. Challenges for semiconductor spintronics. *Nat Phys.* 2007; 3:153–159.
15. Maier S.A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications.* Springer; 2007.