

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТОПЛАЗМОННЫХ МИКРОДИСКОВ

© 2025 г. А. А. Аникин<sup>1,\*</sup>, А. В. Моторжина<sup>1</sup>, В. К. Беляев<sup>1</sup>,  
В. В. Родионова<sup>1</sup>, Л. В. Панина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», Калининград, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

\*E-mail: anikinanton93@gmail.com

Поступила в редакцию 15.11.2024 г.

После доработки 14.12.2024 г.

Принята к публикации 30.12.2024 г.

Изучены электрическая поляризуемость, спектры оптической плотности и фототермические свойства слоевых микродисков Au/Fe/Au и Fe/Au/Fe, синтезированных методом отрывной оптической литографии. Предложен аналитический метод определения электрической поляризуемости в квазистатическом приближении. Теоретические и экспериментальные результаты согласуются в видимой и ближней ИК области спектра. Полученные результаты дают оценку применимости подобных микродисков для комбинированной фототермической и магнитомеханической противораковой терапии.

**Ключевые слова:** слоевые микродиски, электрическая поляризуемость, фототермия, гипертермия, магнитомеханическое стимулирование

DOI: 10.31857/S0367676525040122, EDN: GTPBWP

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитные частицы (МЧ) находят широкое применение в биомедицинской области, в том числе для лечения рака с использованием магнитной гипертермии [1], или магнитно-контролируемой доставке и высвобождении противоопухолевых препаратов в целевую область [2]. В последнее время активно развиваются методы разрушения раковых клеток, основанные на перемещении магнитных частиц в изменяющихся магнитных полях [3, 4]. Наиболее подходящие материалы должны обладать высоким механическим моментом под воздействием переменных магнитных полей. В частности, рассматриваются микродиски с вихревой магнитной структурой в основном состоянии, созданные с помощью магнетронного распыления и последующей оптической литографии [5, 6], нанопровода и нанотрубки, полученные путем электрохимического синтеза в пористых мембранах [7, 8], ультратонкие магнитные частицы с перпендикулярной намагниченностью [9], а также синтетические антиферромагнитные микродиски с нулевой остаточной намагниченностью. Основные трудности при подготовке подобных материалов

возникают в получении устойчивых коллоидных растворов наночастиц при их оптимальных магнитомеханических и гистерезисных свойствах, в уменьшении цитотоксичности, а также в масштабировании методов синтеза.

Использование только одного метода воздействия на клетки может быть недостаточно эффективным. Интерес представляет исследование совместного действия механических сил и нагрева, как за счет магнитной гипертермии, так и фототермии [10–12]. Однако, магнитные материалы, как правило, недостаточно хорошо нагреваются при взаимодействии со светом, особенно в области ближнего ИК диапазона, на длинах волн около 800 нм, который является первым окном прозрачности биологических тканей. С другой стороны, с целью улучшения биосовместимости и стабильности МЧ, а также уменьшению их агломерации используются покрытия из различных биосовместимых материалов, в том числе золота [13]. Это приводит к увеличению оптического поглощения и эффективности фототермического нагрева, что позволяет совместить несколько противораковых терапий с использованием одного типа частиц. Это особенно актуально в контексте развивающейся области наномедицины, где такие частицы могут применять-

ся для создания локальных сил или моментов на биологических образцах при различных температурах и изучения клеточного ответа.

В данной работе исследовались оптические свойства слоистых микродисков в двух конфигурациях Au/Fe/Au (AFA) и Fe/Au/Fe (FAF), изготовленных методом отрывной оптической литографии. Первый тип дисков обладает большим оптическим поглощением вплоть до ИК области и фототермической эффективностью. Тогда как второй тип имеет больший потенциал использования в магнитомеханической терапии.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### *Синтез микродисков AFA и FAF*

Микродиски были синтезированы в ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук». Слоистые металлические диски были получены методом отрывной оптической литографии в сочетании с электронно-лучевым осаждением слоев металлов. Перед формированием полимерной маски подложки Si(100) были химически очищены и обработаны в плазме O<sub>2</sub> для улучшения адгезии. Для получения маски был подготовлен негативный фоторезист ФН 16-4У (разбавлен AZ EBR Solver до толщины 700–800 нм). Нанесение производилось при скорости вращения центрифуги 3000 об/мин в течение 60 с. Затем выполняли этапы сушки в течение 60 с при температуре 110 °С (до и после процедуры экспонирования). Время экспонирования излучением ртутной лампы с длиной волны излучения 365 нм составляло 11 с. После проявки в течение 20 с была получена маска в форме отдельно стоящих колонн из фотополимера. Перед осаждением металлических слоев проводили шадящую 15 с обработку в плазме O<sub>2</sub> при мощности 150 Вт и потоке газа 20 см<sup>3</sup>/мин. Толщину слоев металлов контролировали с помощью кварцевого измерителя толщины.

Для отделения дисков от подложки фоторезист растворяли при помощи диметилсульфоксида (ДМСО). Каждую подложку обрабатывали по отдельности в стаканчике соответствующего диаметра. Для достижения лучшей эффективности и сокращения времени обработки пластины, покрытые ДМСО, помещали на нагревательную плитку (60–70 °С) на 15–20 мин, а затем обрабатывали ультразвуком в течение 2–5 мин. Микродиски собирали с помощью постоянного магнита и микропипетки и помещали в стеклянный флакон. Для дальнейшего хранения диски промывали и разбавляли ацетоном. Данным методом было синтезировано два типа дисков диаметрами 1000 ± 100 нм с разной последовательностью функциональных слоев и их толщиной (в нм): Au(10)/Fe(70)/Au(10) и Fe(50)/Au(10)/Fe(50). Перед исследованием диски промывали и разбавляли дистиллированной водой.

Исследование морфологии микродисков выполняли на растровом электронном микроскопе Hitachi SU3500 методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием детектора вторичных электронов (детектор Эверхарта–Торнли). Получены СЭМ изображения капли суспензии дисков в ацетоне объемом 20–30 мкл, высушенной на подложке кремния Si(100). Перед высушиванием суспензия микродисков была помещена в ультразвуковую ванну Elmasonic S 15 Н на 15 мин при комнатной температуре. Относительное химическое содержание элементов было измерено с помощью энергодисперсионного спектрометра Bruker Quantax 75 в составе сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM4000, ускоряющее напряжение составляло 15 кВ.

### *Оптическая поляризуемость слоистых дисков*

Задача определения поляризуемости тел цилиндрической формы даже в электростатическом приближении не имеет аналитического решения. Существует лишь несколько геометрических фигур, которые позволяют получить аналитическое решение уравнения Лапласа. К таким фигурам относятся сферы, бесконечные цилиндры с круговым сечением (двумерный аналог сферы) и эллипсоиды. Однако круглые цилиндры конечной длины к ним не относятся, хотя они являются основными формами, встречающимися во многих канонических задачах. В работе [14] были выполнены численные расчеты диэлектрической поляризуемости кругового цилиндра для различных значений отношения длина-диаметру ( $l/d$ ). Численные результаты сравнивали с известными результатами для поляризуемости сфероидов (эллипсоид вращения) с таким же отношением  $l/d$ . Расхождение не превышало 1%.

Исходя из этих результатов, слоистые диски аппроксимированы софокусными эллипсоидами. Такая задача решается в рамках единой системы координат ( $\xi, \eta, \zeta$ ), основанной на полуосях внутреннего эллипсоида  $a_1 > b_1 > c_1$ , которые связаны с декартовыми координатами обычным образом [15]. Задача легко обобщается на эллипсоид с  $n$  слоями. Диэлектрическая проницаемость слоев —  $\epsilon_i$ , и диэлектрическая проницаемость внешней среды —  $\epsilon_{ex}$ . Полуоси последующих эллипсоидов определяются как

$$a_i^2 = a_1^2 + d_i, \quad b_i^2 = b_1^2 + d_i, \quad c_i^2 = c_1^2 + d_i. \quad (1)$$

Условие  $\xi = 0$  задает поверхность внутреннего эллипсоида. Далее рассмотрим, случай, когда внешнее электрическое поле  $E_{in}$  однородно и направлено вдоль оси  $z$ . Потенциал внешнего поля  $\varphi_0 = -E_{in}z$  в эллипсоидальных координатах определяется как:

$$\varphi_0 = -E_{\text{in}} \left( \frac{c_1^2 + \xi}{(a_1^2 - c_1^2)(b_1^2 - c_1^2)} \right)^{\frac{1}{2}} g(\eta, \zeta), \quad (2)$$

$$g(\eta, \zeta) = \sqrt{(c_1^2 + \eta)(c_1^2 + \zeta)}.$$

Потенциал  $\varphi_i$  соответствует потенциалу в  $i$ -ом слое, при этом  $\varphi_1$  – потенциал во внутреннем эллипсоиде, и  $\varphi_{n+1}$  – потенциал во внешней среде. Уравнение Лапласа в эллипсоидальных координатах имеет следующий вид:

$$\Delta\varphi = (\eta - \zeta) f(\xi) \frac{\partial}{\partial \xi} \left( f(\xi) \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \right) +$$

$$+ (\zeta - \xi) f(\eta) \frac{\partial}{\partial \eta} \left( f(\eta) \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \right) + \quad (3)$$

$$+ (\xi - \eta) f(\zeta) \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( f(\zeta) \frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} \right) = 0;$$

$$f(u) = ((a_1^2 + u)(b_1^2 + u)(c_1^2 + u))^{1/2}, \quad u = \xi, \eta, \zeta.$$

Поверхности слоев удовлетворяют уравнению  $\xi = d_i$ , поэтому решение для потенциала находится в виде:

$$\varphi = F(\xi) g(\eta, \zeta). \quad (4)$$

Два линейнонезависимых решения для  $F(\xi)$  имеют вид:

$$F_1(\xi) = (c_1^2 + \xi)^{1/2}, \quad (5)$$

$$F_2(\xi) = F_1(\xi) \int_{\xi}^{\infty} \frac{du}{F_1(u)^2 f(u)}.$$

Учитывая ограниченность решения в центре и обращение в нуль потенциала рассеяния  $\varphi_s$  на бесконечности,  $\varphi_1$  и  $\varphi_{n+1}$  записываются в виде:

$$\varphi_1 = A_1 F_1(\xi), \quad -c_1^2 < \xi \leq 0, \quad (6)$$

$$\varphi_{n+1} = \varphi_s + \varphi_0 =$$

$$= \left( B_s F_2(\xi) - E_{\text{in}} \frac{(c_1^2 + \xi)^{\frac{1}{2}}}{((a_1^2 - c_1^2)(b_1^2 - c_1^2))^{\frac{1}{2}}} \right) g(\eta, \zeta), \quad (7)$$

$$d_n < \xi < \infty.$$

где параметр  $B_s$  определяет поляризуемость  $\chi$ .

Общее решение для потенциала в  $i$ -ом слое имеет вид:

$$\varphi_i = (A_2 F_1(\xi) + B_2 F_2(\xi)) g(\eta, \zeta), \quad (8)$$

$$d_{i-1} < \xi \leq d_i.$$

Граничные условия требуют непрерывности потенциалов и нормальных компонент вектора электрической индукции  $D$ . Эти условия записываются как

$$\varphi_i = \varphi_{i+1}, \quad \frac{\varepsilon_i \partial \varphi_i}{\partial \xi} = \frac{\varepsilon_{i+1} \partial \varphi_{i+1}}{\partial \xi}. \quad (9)$$

Система уравнений (9) разделяется на пары, причем первая и последняя пары отличаются от внутренних пар, которые имеют стандартный вид. Это позволяет связать параметры  $A_1$  и  $B_s$  посредством произведения характеристических матриц. Для двухслойного эллипсоида с  $a_1 = b_1, a_2 = b_2$  связь нормированного параметра  $\tilde{A}_1$  и поляризуемости  $\chi$  имеет следующий вид:

$$\tilde{A}_1 \hat{M}_2 \hat{M}_1^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ \varepsilon_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 + \frac{\chi}{\varepsilon_{\text{ex}}} N_{z,2} \\ -\varepsilon_{\text{ex}} + \frac{\chi}{\varepsilon_{\text{ex}}} (N_{z,2} - 1) \end{pmatrix},$$

$$\hat{M}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2N_{z,1} \\ \varepsilon_2 & 2\varepsilon_2 (N_{z,1} - 1) \end{pmatrix},$$

$$\hat{M}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 2\delta N_{z,2} \\ \varepsilon_2 & 2\delta \varepsilon_2 (N_{z,2} - 1) \end{pmatrix}, \quad \delta = \frac{b_1^2 c_1}{b_2^2 c_2}, \quad (10)$$

$$N_{z,1,2} = \frac{1 + \varepsilon_{1,2}^2}{\varepsilon_{1,2}^3} (\varepsilon_{1,2} - \tan^{-1} \varepsilon_{1,2}),$$

$$\varepsilon_{1,2} = \sqrt{\frac{b_{1,2}^2}{c_{1,2}^2} - 1}.$$

Для поляризуемости в поперечном направлении (например, вдоль оси  $x$ ) факторы  $N_{z,1,2}$  должны быть заменены на  $(1 - N_{z,1,2})/2$ .

#### Спектроскопия и фототермия

Спектры водных растворов микродисков измеряли с помощью оптоволоконного спектрометра BWTEK Exemplar. В качестве источника света использовали лампу на основе глобара ThorLabs SLS203F.

Количественная оценка фототермических свойств водных суспензий микродисков была выполнена с помощью измерения температуры при нагреве ИК лазером и последующем охлаждении. Термостабилизированный лазерный диод (L808P1000MM, ThorLabs) с длиной волны 806 нм имел интенсивность 2.4 Вт/см<sup>2</sup> при общей выходной оптической мощности 0.625 Вт. Мощность диода, а также стабильность интенсивности прошедшего через раствор света в ходе фототермического нагрева анализировали с помощью фотодиода в интегрирующей сфере (S142, ThorLabs). Объем кубической стеклянной кюветы для суспензий наночастиц составлял 1.9 мл. Кюветы герметично закрывались для предотвращения испарения. Температуру суспензий измеряли с помощью ИК-камеры (CG640, COX). Для лучшей стабильности наночастиц в водные суспензии частиц добавляли сурфактант додецилсульфат натрия (SDS) в количестве 5% по массе. Для предотвращения оседания наночастиц во время фототермического нагрева кюветы были помещены на магнитную мешалку. На дно кювет был помещен слабомагнитный якорь, не перекрывающий лазерный пучок.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

## Синтез микродисков AFA и FAF

СЭМ изображения микродисков AFA и FAF представлены на рис. 1. Было установлено, что образцы AFA имеют средний линейный размер  $1000 \pm 100$  нм, с шероховатостью поверхности  $R_q = 3 \pm 1$  нм и  $R_a = 2 \pm 1$  нм (рис. 1а–в). Число атомов золота к числу атомов железа относится примерно как 1:6. Образцы, приготовленные из водной суспензии FAF, в высушенном виде имеют сильную тенденцию к агломерации, что затрудняет проведение количественного анализа, тем не менее, было установлено, что образцы имеют средний линейный размер  $1000 \pm 100$  нм и склонны к образованию агломератов  $\sim 2$ – $10$  мкм, с шероховатостью поверхности  $R_q = 31 \pm 10$  нм и  $R_a = 24 \pm 10$  нм (рис. 1г–е). Число атомов золота к числу атомов железа относится примерно, как 1:17.

## Оптическая поляризуемость слоистых дисков

Поляризуемость микродисков будет зависеть от направления поляризации света относительно плоскости диска. На рис. 2 представлены спектральные характеристики мнимой части электрической поляризуемости для дисков обоих составов. Оптические константы для диэлектрической проницаемости Au и Fe взяты из [16,17]. В водных суспензиях микродиски ориентированы хаотически, и оба вклада будут проявляться

на спектральных характеристиках одновременно. В случае, когда электрическое поле направлено перпендикулярно плоскости дисков, для обоих составов наблюдаются пики в области более коротких длин волн. Поляризуемость дисков в конфигурации, когда электрическое поле направлено вдоль поверхности (рис. 2а), значительно превосходит значение для перпендикулярной ориентации (рис. 2б). В случае AFA наблюдается хорошо выраженный пик на длине волны 765 нм. Для дисков состава FAF имеется широкий пик в области 650 нм, что обусловлено затуханием электромагнитного поля в верхних слоях Fe. Между тем в обоих случаях значения поляризуемости в инфракрасной области остаются высокими, то есть можно ожидать значительный фототермический эффект в области прозрачности тканей.

## Спектроскопия и фототермия

Спектры оптической плотности суспензий микродисков в концентрации 100 мкг/мл представлены на рис. 3а. С учетом абсолютной шкалы оптической плотности образцы не показывают выделенного диапазона длин волн, на которых происходит заметно повышенное поглощение. Это связано со случайной ориентацией частиц в суспензии, а также с их спонтанной агломерацией из-за наличия намагниченности, которая приводит к уширению пиков погло-

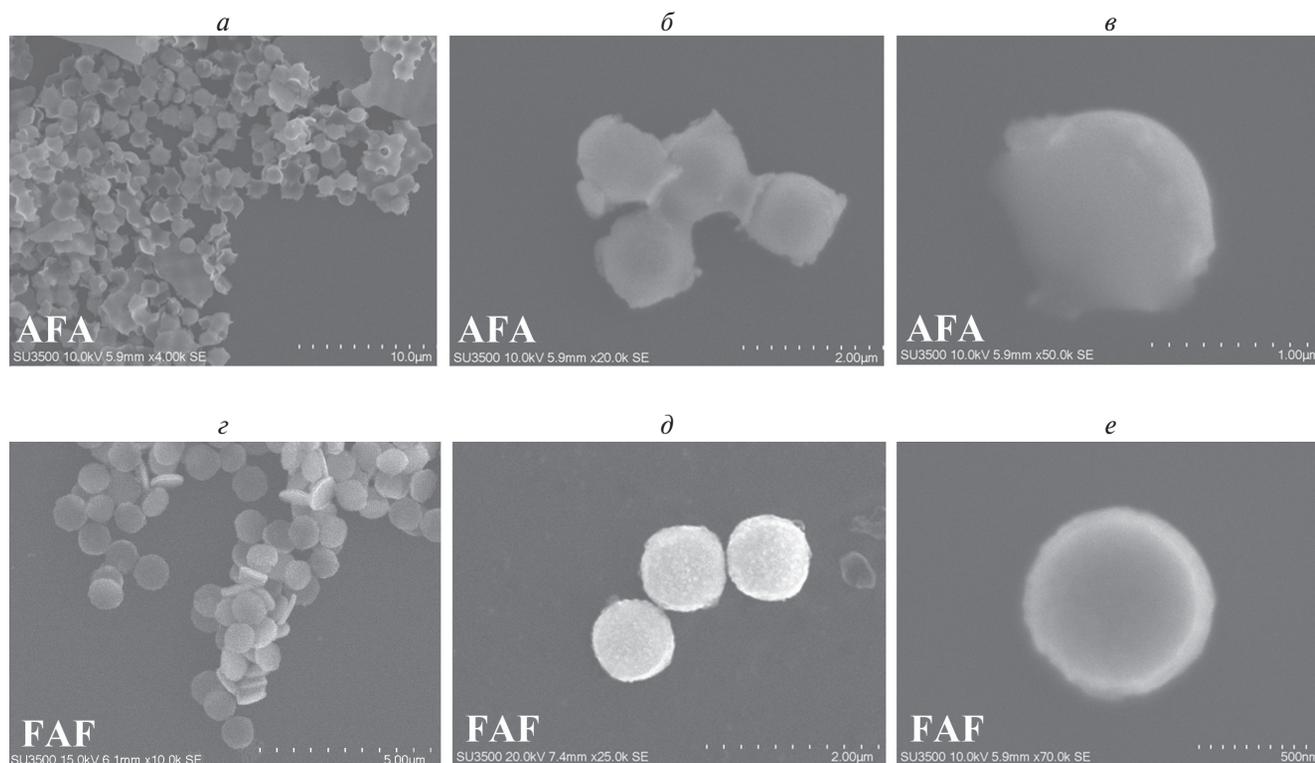
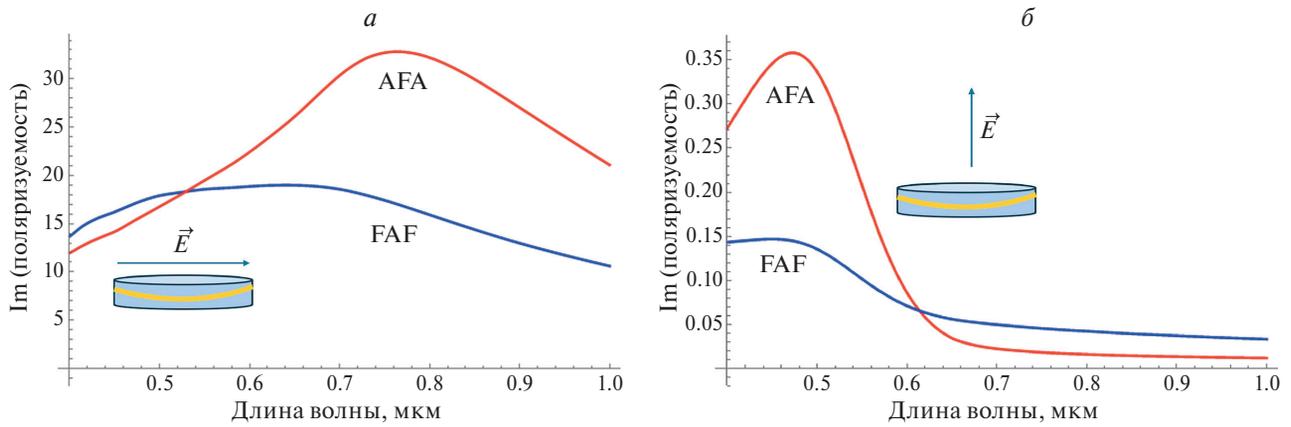
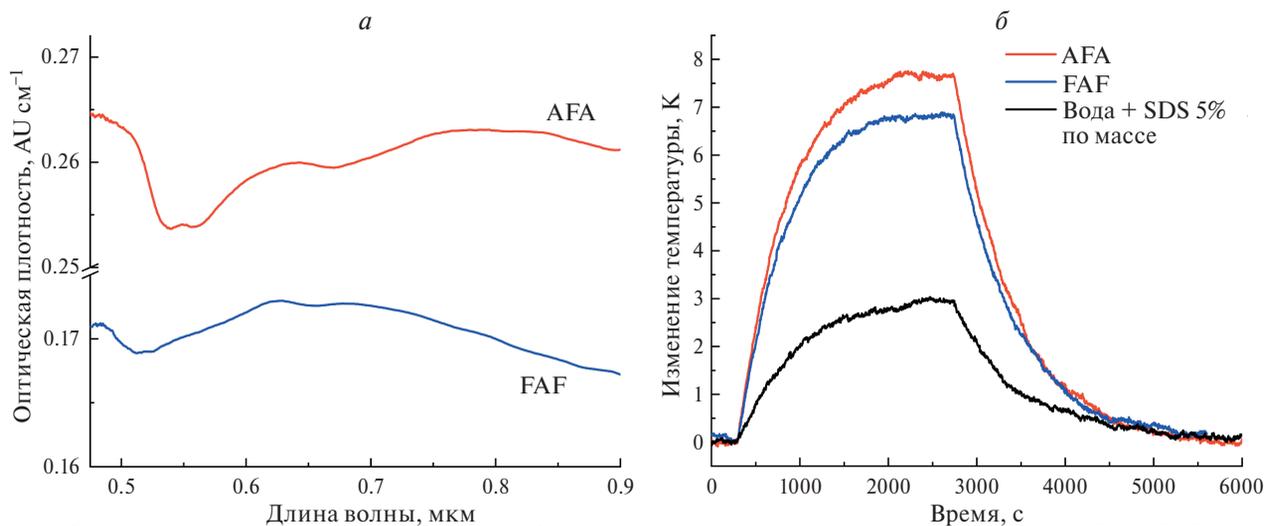


Рис. 1. Изображения, полученные методом СЭМ для образцов с толщинами функциональных слоев Au(10 нм)/Fe(70 нм)/Au(10 нм) (AFA) (а–в) и Fe(50 нм)/Au(10 нм)/Fe(50 нм) (FAF) (г–е).



**Рис. 2.** Спектры поляризуемости микродисков AFA и FAF для электрического поля, направленного вдоль (а) и перпендикулярно (б) плоскости дисков.



**Рис. 3.** Экспериментальный спектр оптической плотности водных суспензий микродисков AFA и FAF, взятых в концентрации 100 мкг/мл (а); фототермический нагрев водных суспензий микродисков AFA и FAF, взятых в концентрации 100 мкг/мл, с добавлением SDS в количестве 5% по массе (б).

щения и рассеяния. Суспензия микродисков AFA имеют примерно в 1.5 раза большую оптическую плотность на всем исследованном диапазоне, чем FAF, как и ожидалось по результатам моделирования их поляризуемости. Также прослеживаются широкие пики в области около 600–700 нм для FAF и 700–900 нм для AFA, соответствующие спектрам поляризуемости, представленным выше.

Водные суспензии микродисков демонстрируют относительно хорошую стабильность, не меняя значений оптической плотности за время спектроскопического измерения. Тем не менее, они не являются в полной мере коллоидно-стабильными и на выдержке больше 15 мин начинают оседать, меняя степень пропускания. Решить это может покрытие сурфактантами, приводящими к увеличению дзета-потенциала, а также препятствующими взаимодействию магнитных моментов микродисков.

Для определения фототермической производительности микродисков для фототермической терапии изучить одни их спектроскопические характеристики недостаточно. Также необходимо получить значения доли attenuированной суспензиями микродисков энергии света, перешедшей в тепловую энергию суспензии, которая выражается коэффициентом фототермической конверсии ( $\eta$ ). Сделать это можно, измерив максимальные температуры нагрева и скорость охлаждения суспензии, при включении и выключении лазера соответственно. В таком случае можно найти коэффициент в приближении теормоэстатического равновесия [18]:

$$\eta = \frac{\sum_i m_i c_i \left( \frac{\Delta T_{\max}}{\tau} - \frac{\Delta T_{\max}^0}{\tau_0} \right)}{P_0 (1-r) \left( 1 - \frac{I}{I_0} \right)}, \quad (11)$$

где  $\sum_i m_i c_i$  — общая теплоемкость кюветы с суспензией,  $\Delta T_{\max}$  и  $\Delta T_{\max}^0$  — максимальные темпе-

ратуры нагрева, а  $\tau$  и  $\tau_0$  – характеристическое время охлаждения суспензии микродисков и растворителя без микродисков, соответственно. Характеристическое время находится из кривых охлаждения, как показатель экспоненты. Мощность падающего излучения с поправкой на отражения равна  $P_0(1-r)$ , а  $\left(1 - \frac{I}{I_0}\right)$  – доля аттенуированной мощности падающего излучения суспензией.

Зависимость температуры суспензий при нагреве лазером от времени представлена на рис. 3б. Микродиски АФА, покрытые золотом снаружи, показывают более высокие температуры нагрева при одинаковой концентрации частиц в 100 мкг/мл. Рассчитанные с помощью выражения (11) коэффициенты фототермической конверсии равны  $27 \pm 1\%$  и  $30 \pm 1\%$  для микродисков АФА и FAF, соответственно. Значения коэффициентов у слоистых микродисков несколько ниже, чем у плазмонных золотых наночастиц, предназначенных специально для фототермии на используемых длинах волн около 800 нм. Однако, они выше привычных значений для магнитных наночастиц. Присутствие золота дает выше температуры нагрева, при этом есть возможность воздействовать на частицы магнитным полем. Также на значение коэффициента могло сказаться присутствие в суспензиях сурфактанта, приводящего к большей мутности раствора, и соответственно к большему рассеянию излучения. Более низкое по сравнению с FAF значение коэффициента фототермической конверсии у микродисков АФА мы также ассоциируем с большим рассеянием золотого слоя.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами были изучены слоистые микродиски, полученные методом отрывной оптической литографии в сочетании с электронно-лучевым осаждением слоев металлов. Данным методом было синтезировано два типа дисков диаметрами  $1000 \pm 100$  нм с разной последовательностью функциональных слоев и их толщиной (в нм): Au(10)/Fe(70)/Au(10) и Fe(50)/Au(10)/Fe(50). Исследованы спектры оптического поглощения. Был разработан аналитический метод вычисления диэлектрической поляризуемости слоистых дисков, аппроксимируя их форму софокусными сфероидами. Электрическая поляризуемость в электрическом поле вдоль поверхности дисков значительно больше, чем при перпендикулярном направлении поля для обоих типов. Для параллельной поляризации, экстинкция остается высокой вплоть до ИК области спектра. При воздействии лазерным излучением ближнего ИК диапазона на суспензии микродисков они демонстрируют относительно хорошие степени нагрева, превышая таковы у магнитных частиц без золота в составе.

Эффективность преобразования энергии ИК излучения в тепло составила  $27 \pm 1\%$  и  $30 \pm 1\%$  для микродисков АФА и FAF, соответственно, что является достаточно хорошим показателем с учетом их значимого оптического поглощения в данном диапазоне. Проведенное исследование показывает, что слоистые микродиски могут быть потенциальными кандидатами для комбинированной магнитомеханической и фототермической терапии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-20158). А. Моторжина благодарит программу стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» БФУ им. И. Канта (научный проект № 123120500049-7) за поддержку разработки методологии и исследований фототермии микродисков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kafrouni L., Savadogo O. // *Progr. Biomater.* 2016. V. 5 P. 147.
2. Oliveira H., Pérez-Andrés E., Thevenot J. et al. // *J. Control. Release.* 2013. V. 169. P. 165.
3. Naud C., Thébault C., Carrière M. et al. // *Nanoscale Adv.* 2020. V. 2. P. 3632.
4. Головин Ю.И., Жигачев А.О., Клячко Н.Л., Кабанов А.В. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2018. Т. 82. № 9. С. 1182; Golovin Y.I., Zhigachev A.O., Klyachko N.L. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2018. V. 82. No. 9. P. 1073.
5. Kim D.H., Rozhkova E.A., Ulasov I.V. et al. // *Nature Mater.* 2009. V. 9. P. 165.
6. Novosad V., Rozhkova E.A. // In: *Biomedical Engineering, Trends in Materials Science*, 2011. P. 425.
7. Contreras M., Sougrat R., Zaher A. et al. // *IJN.* 2015. V. 10. P. 2141.
8. Аникин А.А., Шумская Е.Е., Бедин С.А. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2024. Т. 88. № 4. С. 683; Anikin A.A., Shumskaya E.E., Bedin S.A. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2024. V. 88. No. 6. P. 1010.
9. Mansell. R., Vemulkar T., Petit D.C.M.C. et al. // *Sci. Reports.* 2017. V. 7. Art. No. 4257.
10. Efremova M.V., Naumenko V.A., Spasova M. et al. // *Sci. Reports.* 2018. V. 8. Art. No. 11295.
11. Shi X., Tian Y., Liu Y. et al. // *Front. Oncol.* 2022. V. 12. Art. No. 939365.
12. Espinosa A., Kolosnjaj-Tabi J., Abou-Hassan A. et al. // *Adv. Funct. Mater.* 2018. V. 28. Art. No. 1803660.
13. Субекин А.Ю., Пылаев Т.Е., Кукушкин В.И. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2024. Т. 88. № 2. С. 211; Subekin A.Y., Pylaev T.E., Kukushkin V.I. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2024. V. 88. P. 178.
14. Venermo J., Sihvola A. // *J. Electrostat.* 2005. V. 63. P. 101.
15. Bohren C.F., Huffman D.R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles.* N.Y.: Wiley, 1983. 533 p.
16. Johnson P.B., Christy R.W. // *Phys. Rev. B.* 1972. V. 6. P. 4370.

17. Johnson P.B., Christy R.W. // Phys. Rev. B. 1974. V. 9. P. 5056.      18. Roper D.K., Ahn W., Hoepfner M. // J. Phys. Chem. C. 2007. V. 111. P. 3636.

## Optical properties of magnetoplasmonic microdisks

A. A. Anikin<sup>a,\*</sup>, A. Motorzhina<sup>a</sup>, V. K. Belyaev<sup>a</sup>, V. V. Rodionova<sup>a</sup>, L. V. Panina<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041, Russia

<sup>b</sup>National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, 119049, Russia

\*e-mail: anikinanton93@gmail.com

We investigated the polarizability, optical density spectra, and photothermal properties of Au/Fe/Au and Fe/Au/Fe layered microdisks synthesized by lift-off optical lithography. An analytical method for determining the electric polarizability in the quasi-static approximation is proposed. Theoretical and experimental results are consistent in the visible and near-IR spectral ranges. The results obtained provide an assessment of the applicability of such microdisks for combined photothermal and magnetomechanical anticancer therapy.

*Keywords:* layered microdisks, electrical polarizability, photothermia, hyperthermia, magnetomechanical stimulation