08

Трехэтапный синтез композитных наноматериалов на основе железа и золота методами лазерной абляции и вспомогательного ультразвукового воздействия

© А.С. Черников, Д.А. Кочуев, Р.В. Чкалов, М.А. Дзус, Е.И. Шингарёва, К.С. Хорьков

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
600000 Владимир, Россия
e-mail: khorkov@vlsu.ru

Поступило в Редакцию 9 декабря 2025 г.
В окончательной редакции 9 декабря 2025 г.
Принято к публикации 9 декабря 2025 г.

Представлены результаты применения трехэтапного синтеза композитных наночастиц, в основе которого лежит комбинация методов фемтосекундной лазерной абляции и ультразвукового воздействия. Синтез осуществлен методом лазерной абляции в деионизованной воде и методом лазерной абляции в газовой среде (аргон или воздух) в присутствии магнитного или электростатического поля. Используемый подход привел к формированию композитных магнито-плазмонных наночастиц с конфигурацией „ядро–сателлиты". Для двух типов рассматриваемых композитных наночастиц наблюдалось красное смещение положения плазмонного резонанса с 520 nm (исходные золотые наночастицы) до 545−548 nm (композитные магнито-плазмонные наночастицы). Нагрев растворов композитных наночастиц Fe_3O_4–Au и PVP α-Fe–Au с концентрацией 0.06 и 0.07 mg/ml составил 10.6 °C и 16.2 °C соответственно. Полученные экспериментальные данные подтверждают возможность применения предлагаемого комбинированного подхода для создания композитных наночастиц, обладающих магнитными и плазмонными свойствами. Данный подход позволил гибко варьировать условия синтеза для получения наночастиц с необходимыми свойствами.

Ключевые слова: лазерная абляция, лазерная фрагментация, магнитные наночастицы, наночастицы золота, композитные наночастицы, фототермический отклик, магнито-плазмонные наночастицы.

DOI: 10.61011/JTF.2026.05.62755.333-25

Введение

Комбинация методов синтеза и управления формированием наночастиц (НЧ) заданных параметров открывает возможности изготовления новых типов материалов. Лазерная абляция в жидкостях позволяет синтезировать композитные НЧ путем абляции многослойных мишеней или объемных сплавов, получения метастабильных сплавов, структур „ядро–сателлиты" или биметаллических частиц с контролируемым размером и составом [1–4]. Получение НЧ, обладающих комбинированными свойствами, является логичным продолжением отработки технологий контролируемого и управляемого синтеза. НЧ с выраженными магнитными и фотосенсибилизированными свойствами применяются для гипертермии, что является актуальной задачей современной биологии и медицины [5–8]. Плазмонные фототермические свойства наночастиц золота широко изучаются в области биомедицины для обеспечения фототермического эффекта в ответ на облучение внешним источником света [9]. В современных онкологических исследованиях наблюдается устойчивый переход от монотерапии к комбинированным методам лечения, демонстрирующим существенно более высокую эффективность. Гибридные мультимодальные НЧ используются как контрастные вещества для двойной магнитно-резонансной томографии и компьютерной томографии, а также как сенсибилизаторы для лазерно-индуцированной гипертермии раковых клеток [10]. Перспективным направлением является интеграция магнитной гипертермии с другими терапевтическими модальностями, включая фототермическую, фотодинамическую, лучевую, иммуно- и химиотерапию. Это ставит актуальную задачу по разработке многофункциональных платформ на основе магнитных НЧ, призванных усилить синергетический эффект комбинированного воздействия для достижения максимальной противоопухолевой эффективности при минимальном уровне побочных реакций [11–13]. Размер НЧ влияет на релаксационные свойства протонов биологических жидкостей и тканей, поэтому необходимо прослеживать зависимости размерных и структурных параметров НЧ при воздействии на биологические объекты. Комбинация магнитных и фотосенсибилизированных свойств в одних композитных НЧ, полученных лазерным синтезом, открывает возможности для создания универсальных платформ для одновременной диагностики, адресной доставки и комбинированного лечения [14–18].

Целью настоящей работы является получение композитных магнито-плазмонных НЧ на основе железа и золота с конфигурацией „ядро–сателлиты" с помощью трехэтапного синтеза. Магнитные НЧ Fe_3O_4 или α-Fe служат ядром, а золотые НЧ — сателлитами. В основе

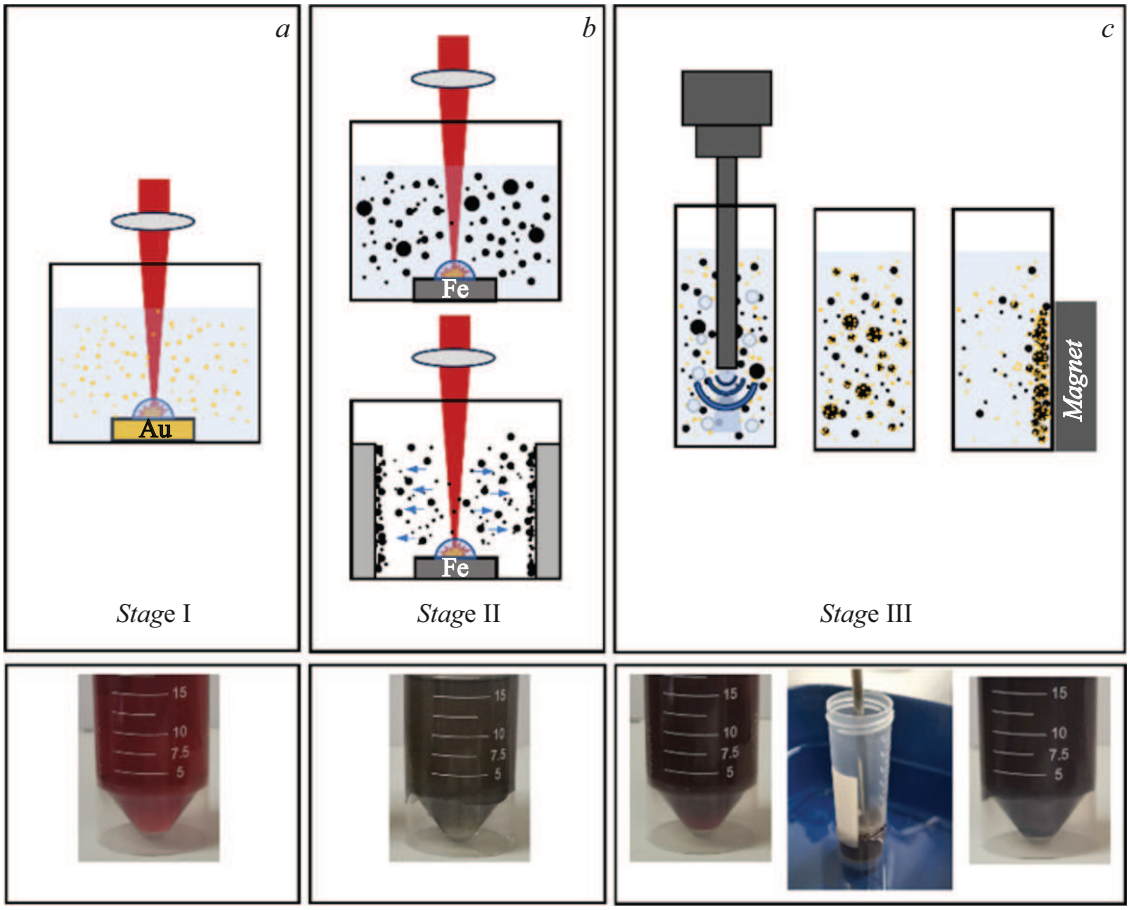

Рис. 1. Схематичное представление трехэтапного синтеза композитных наноматериалов на основе железа и золота методами лазерной абляции и вспомогательного ультразвукового воздействия. *a* — синтез золотых НЧ; *b* — синтез магнитных НЧ; *c* — УЗ воздействие на смесь растворов.

предлагаемого подхода лежит комбинация методов фемтосекундной лазерной абляции для получения исходных НЧ и ультразвукового воздействия для формирования композитных НЧ. Для очистки и отбора целевых продуктов применялся метод магнитной сепарации в жидкой среде.

1. Материалы и схемы проведения экспериментов

В основе используемого трехэтапного синтеза лежит комбинация методов лазерной абляции и ультразвукового воздействия. В качестве источника излучения в экспериментах по лазерному абляционного синтезу использовалась Yb:KGW фемтосекундная лазерная система (Авеста, Россия), длина волны излучения 1030 nm, максимальная энергия в импульсе 150 μJ, длительность импульса 280 fs, частота следования импульсов 10 kHz. Сканирование лазерным лучом по поверхности мишени в процессе лазерной абляции и фрагментации в жидкой среде проводилось с помощью X–Y-гальваносканера, фокусировка осуществлялась с помощью F-theta линзы с рабочим расстояние 200 mm. В качестве жидкой среды была использована деионизованная вода. В экспериментах были использованы мишени железа и золота высокой чистоты ($>$ 99.95 %).

Схематичное изображение трехэтапного процесса синтеза композитных наноматериалов на основе железа и золота методами лазерной абляции и вспомогательного ультразвукового воздействия представлено на рис. 1.

Первый этап заключался в синтезе коллоидных растворов НЧ золота (рис. 1, *a*). Мишень располагалась в кювете, наполненной 1 mmol раствора NaCl. Сканирование лазерным лучом по поверхности мишени производилось с помощью гальваносканера, энергия в импульсе была установлена на уровне 30 μJ, продолжительность процесса составляла от 30 до 90 min в зависимости от объема. Концентрация полученного коллоидного раствора составляла 0.125 mg/ml. Для отбора частиц минимального размера применяли этап центрифугирования. По завершению процесса производился отбор надосадочной жидкости, которая использовалась в дальнейших экспериментах. В качестве альтернативы этапу центрифугирования мог применяться метод фемтосекундной

лазерной фрагментации в жидкой среде (энергия в импульсе 100 μJ, продолжительность процесса 30 min). В результате лазерной фрагментации общее количество золотых НЧ увеличивается за счет преобразования крупных частиц в множество более мелких. Это приводит к смещению распределения по размерам в область меньших диаметров, что проявляется в синем смещении положения плазмонного резонанса и снижении оптической плотности в длинноволновой области спектре, при этом исходная массовая концентрацию коллоидного раствора сохраняется. Сохранение массовой концентрации является существенным преимуществом по сравнению с центрифугированием исходного раствора. В случае центрифугирования значительная часть материала удаляется в осадок, а целевая фракция остается в надосадочной жидкости, что в результате приводит к снижению массовой концентрации коллоидного раствора.

Целью второго этапа являлось получение НЧ, обладающих магнитными свойствами (рис. 1, *b*). Синтез осуществлялся методом лазерной абляции в деонизованной воде и методом лазерной абляции в газовой среде (аргон или воздух) в присутствии магнитного или электростатического поля [19,20]. В обоих случаях следующим шагом являлся отбор НЧ, обладающих магнитными свойствами, который проводился путем магнитной сепарации в жидкой среде (ацетон для НЧ, синтезированных в аргоне, и деионизованная вода для всех остальных НЧ).

Эксперименты по лазерной абляции мишени железа в газовой среде (аргон, воздух) проводились в изолированном сосуде. При использовании аргона производилась прокачка сосуда с расходом 1 l/min, процесс абляции начинался спустя 5 min после начала прокачки. В процессе лазерного абляционного синтеза расход газа не изменялся. Вынос продуктов абляции из зоны воздействия и их прогнозируемое осаждение осуществлялось под действием электростатического или магнитного полей в зависимости от используемой конфигурации сосуда (электроды или постоянные магниты). Смена используемой конфигурации осуществлялась путем минимальных конструктивных изменений. Мишень располагалась между параллельно расположенными электродами или постоянными магнитами. Энергия в импульсе была установлена на уровне 50 μJ.

Электростатическое поле между электродами создавалось источником высокого напряжения и изменялось в диапазоне от 6 до 60 kV через высоковольтные электрические вводы, расположенные на стенке изолированного сосуда. Постоянные магниты (максимальное магнитное поле 3000 G) с закрепленными кварцевыми подложками располагались одноименно заряженными полюсами друг к другу. По завершению процесса синтеза продукты абляции, осажденные на поверхность электродов или кварцевых пластин (под действием электростатического и магнитного полей соответственно), были собраны с помощью шпателя и помещены в предварительно взвешенные пробирки. При проведении экспериментов в воздухе эффективный вынос продуктов абляции и их прогнозируемое осаждение возможно в присутствии электростатического или магнитного полей. При использовании аргона эффективное осаждение продуктов абляции возможно только в присутствии магнитного поля, в присутствии электростатического поля наблюдалось зависание продуктов абляции между электродами и их перемещение по сосуду без выраженного осаждения на поверхность кварцевых пластин. Осаждение НЧ на поверхность электродов зарегистрировано на уровне менее 5 % от общей массы удаленного материала мишени.

Полученные магнитные НЧ совместно с золотыми НЧ были использованы на заключительном этапе, целью которого являлось формирование композитных магнито-плазмонных НЧ с конфигурацией „ядро–сателлиты“ в результате ультразвукового воздействия на раствор, полученный в результате смешивания двух типов НЧ (рис. 1, *c*). В данной конфигурации „ядро“ — магнитная НЧ, „сателлиты“ — НЧ золота на поверхности „ядра“. Источником ультразвукового воздействия (УЗ) в данном эксперименте являлся погружной диспергатор УЗТА-0,1/28-О (Центр Ультразвуковых технологий, Бийск), максимальная интенсивность УЗ-воздействия 300 W/cm^2 с частотой ультразвуковых колебания (28 ± 2.5) kHz, диаметр наконечника 4.5 mm. УЗ воздействие осуществлялось при интенсивности в 240 W/cm^2 (80 % от максимального значения), во избежание перегрева во время УЗ воздействия, пробирка с раствором располагалась в сосуде, наполненном холодной водой и льдом, продолжительность УЗ воздействия составляла 20 min. По завершению процесса проводился этап магнитной сепарации с целью отделения композитных магнито-плазмонных НЧ от золотых НЧ, не вступивших в реакцию с магнитными НЧ.

При проведении экспериментов по синтезу композитных НЧ на основе железа и золота, в которых в качестве компонентов были использованы коллоидный раствор золотых НЧ и раствор магнитных НЧ, полученных методом лазерной абляции железа в аргоне (НЧ нуль-валентного железа (zero valent iron (ZVI) (Fe^0)) в фазе альфа-железа (α-Fe)), был необходим дополнительный этап, направленный на функционализацию НЧ α-Fe. В случае, когда магнитным компонентом являлись НЧ, полученные методом лазерной абляции железа в воздухе, этап функционализации не проводился. Так, раствор НЧ α-Fe был приготовлен путем переноса НЧ, синтезированных методом лазерной абляции железа в аргоне, хранящихся в ацетоне, в этанол (95 %). Затем в пробирку с НЧ добавлялся поливинилпирролидон K30 (PVP, M.W. 40 000), концентрация PVP в растворе составляла 10 mg/ml, данная процедура была необходима для модификации поверхности НЧ с целью уменьшения вероятности окисления НЧ при взаимодействии с кислородосодержащей средой и повышения коллоидной стабильности НЧ. Пробирка с полученным раствором помещалась в ультразвуковую ванну на 60 min, затем

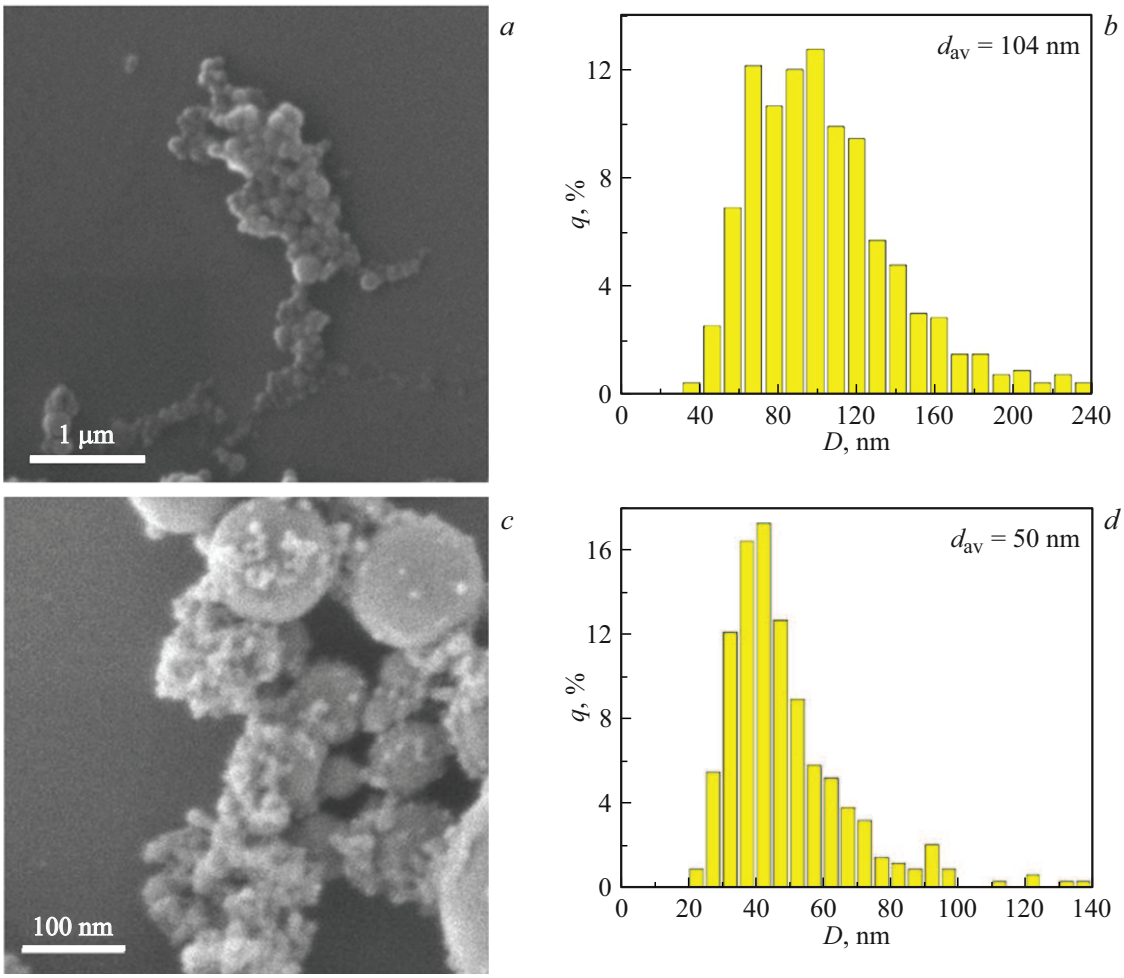

Рис. 2. СЭМ изображения и гистограммы распределения частиц по размерам: магнитные НЧ, полученные методом лазерной абляции железа в воздухе (a, b); композитные НЧ на основе железа и золота, полученные в результате трехэтапного синтеза (c, d).

производилась очистка несвязанного PVP путем магнитной сепарации НЧ и промывки этанолом (дважды), а затем деионизованной водой (один раз). На заключительном этапе проводилась замена деионизованной воды на коллоидный раствор НЧ золота, таким образом в приготовленном растворе находились PVP модифицированные НЧ α-Fe и НЧ золота. Далее раствор подвергался ультразвуковому воздействию с помощью погружного диспергатора, по завершению процесса проводился этап магнитной сепарации. Установлено, что после отбора магнитных НЧ, раствор имел насыщенный красный цвет, что свидетельствует о том, что часть золотых НЧ не вступила в реакцию с магнитными НЧ, что ставит вопрос о выборе оптимального соотношения НЧ в растворе перед началом УЗ воздействия.

2. Результаты синтеза и их обсуждение

Исследование морфологии синтезированных НЧ проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (Quanta 200 3D, FEI), размеры НЧ определяли вручную на основе анализа СЭМ изображений. На рис. 2, a, c представлены СЭМ изображения магнитных НЧ, полученных методом лазерной абляции железа в воздухе, и композитных НЧ на основе железа и золота, которые были получены в результате трехэтапного синтеза соответственно. Соответствующие гистограммы распределения частиц по размерам представлены на рис. 2, b, d.

Используемый подход приводит к формированию композитных НЧ с конфигурацией „ядро–сателлиты“ (неравномерно распределенные НЧ золота непосредственно на поверхности более крупных магнитных НЧ). Стоит отметить факт уменьшения средних размеров НЧ в результате УЗ воздействия, так, НЧ, приготовленные на втором этапе (лазерная абляция железа в воздухе), имели средний размер 104 nm, а по завершению третьего этапа средний размер уменьшился вдвое и составил 50 nm. Электростатическое притяжение разнозаряженных частиц, вероятно, является одним из возможных механизмов формирования композитных НЧ

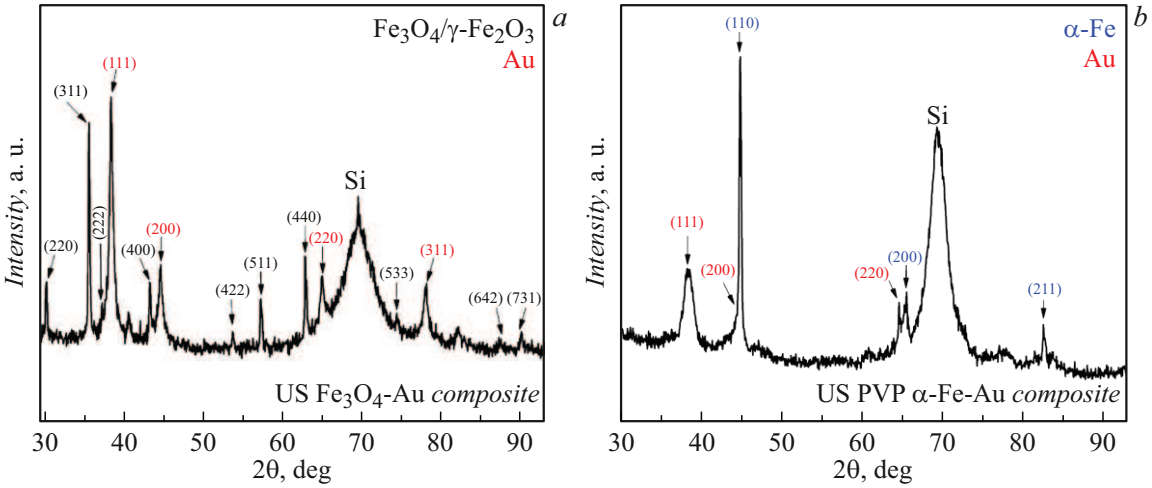

Рис. 3. Дифрактограммы композитных НЧ на основе железа и золота, полученных в результате трехэтапного синтеза методами лазерной абляции и вспомогательного ультразвукового воздействия: магнитные НЧ получены методом лазерной абляции железа в воздухе (*a*); магнитные НЧ получены методом лазерной абляции железа в аргоне (*b*).

в конфигурации „ядро–сателлиты“. При наличии у НЧ различного заряда поверхности НЧ золота покрывают НЧ железа. При ультразвуковом воздействии контакт разнозаряженных НЧ становится более вероятным, таким образом обеспечивая эффективный процесс формирования композитных НЧ. Кроме того, акустическая кавитация (образование, рост и разрушение газообразных микропузырьков) и особые условия, возникающие в процессе УЗ обработки, могут способствовать формированию композитных НЧ за счет различных механических эффектов [21]. Уменьшение размеров НЧ в результате УЗ воздействия вероятно связано с механическим воздействием, которое приводит с деагломерации частиц, так и их фрагментации, при этом наличие дефектов поверхности НЧ делает процесс фрагментации более вероятным.

Для исследования структурных особенностей и химического состава синтезированных НЧ был использован метод рентгеновской дифрактометрии. Анализ проводился с помощью порошкового рентгеновского дифрактометра Bruker D9 ADVANCE (Bruker, Германия), источником излучения являлась длиннофокусная трубка CuKα (длина волны $\lambda = 1.542$ Å). На рис. 3 представлены дифрактограммы композитных НЧ на основе железа и золота, полученных в результате трехэтапного синтеза методами лазерной абляции и вспомогательного ультразвукового воздействия: магнитные НЧ получены методом лазерной абляции железа в воздухе (рис. 3, *a*); магнитные НЧ получены методом лазерной абляции железа в аргоне (рис. 3, *b*).

На рис. 3, *a* видно присутствие дифракционных пиков при 30.46, 35.76, 37.38, 43.4, 53.78, 57.25, 62.82, 74.3, 87.32, 89.96 deg, которые соответствуют рассеянию на плоскостях кристаллической решетки с ориентацией (220), (311), (222), (400), (422), (511), (440), (533), (622), (642) и (731) магнетита (Fe_3O_4) и/или маггемита (γ-Fe_2O_3) соответственно [22]. Данный набор пиков и их интенсивность практически полностью совпадают с дифракционной картиной, наблюдаемой для магнитных НЧ, синтезированных методом лазерной абляции в воздухе (методом комбинационного рассеяния было подтверждено присутствие фазы Fe_3O_4, иных фаз обнаружено не было). Кроме того, присутствуют пики при 38.49, 44.71, 64.91 и 78.02 deg, относящиеся к плоскостям (111), (200), (220) и (311) золота (Au) [23], которые наблюдались и в случае композитных НЧ, полученных в результате двухэтапного абляционного синтеза в жидкой среде [18]. Пик при 69.3 deg относится к плоскости (400) кремния (кремниевая пластина, на которую осаждались НЧ). На рис. 3, *b* можно наблюдать дифракционные пики при 44.81, 65.24, 82.48 deg, которые соответствуют плоскостям (110), (200) и (211) α-Fe [24], данный набор пиков совпадает с дифрактограммой магнитных НЧ, синтезированных методом лазерной абляции в аргоне, что свидетельствует о сохранении исходной фазы магнитных НЧ после УЗ воздействия. Также присутствуют пики при 38.48, 44.68, 64.75 deg, которые относятся к плоскостям (111), (200), (220) золота.

Оптические свойства полученных коллоидных растворов были исследованы методом спектрофотометрии с помощью спектрофотометра СФ-2000 (ОКБ-Спектр, Россия). Измерения проводились в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 10 mm. На рис. 4 представлены кривые оптической плотности раствора НЧ золота, раствора НЧ Fe_3O_4, синтезированных методом лазерной абляции в воздухе (жидкая среда деионизованная вода), растворов композитных НЧ Fe_3O_4–Au, полученных в результате ультразвукового воздействия после одного и трех этапов магнитной сепарации.

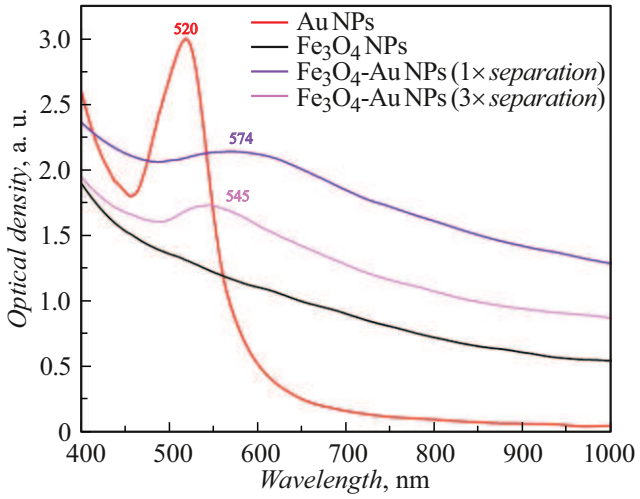

Рис. 4. Кривые оптической плотности раствора НЧ золота (красная кривая); раствора НЧ Fe_3O_4 (черная кривая), синтезированных методом лазерной абляции в воздухе (жидкая среда — деионизованная вода); растворов композитных НЧ Fe_3O_4–Au, полученных в результате ультразвукового воздействия после одного (фиолетовая кривая) и трех этапов магнитной сепарации (розовая кривая).

Наблюдается красное смещение положения плазмонного резонанса с 520 до 574 nm в случае раствора после одного этапа магнитной сепарации. В то время, как для раствора после трех этапов магнитной сепарации положение плазмонного резонанса смещается к 545 nm с сохранением протяженного плеча, распространяющегося в длинноволновую область спектра.

Перед началом измерений оптических свойств растворы были разбавлены в 5 раз. Кривые оптической плотности растворов НЧ золота, НЧ PVP α-Fe, композитных НЧ PVP α-Fe–Au и не вступивших в реакцию золотых НЧ (розовая кривая), представлены на рис. 5, *a*. На рис. 5, *b* представлена фотография коллоидных растворов золотых НЧ и композитных НЧ. На рис. 5, *c* — фотография коллоидных растворов золотых НЧ и композитных НЧ спустя 1 min после внесения постоянного магнита.

Положение плазмонного резонанса для композитных НЧ смещается к 548 nm, в целом наблюдаемая спектральная картина имеет сильное сходство с описанными ранее особенностями композитных НЧ.

3. Фототермические свойства композитных НЧ на основе железа и золота

Проведение экспериментальных работ, связанных с измерением фототермического отклика полученных коллоидных систем, выполнено согласно представленной схеме на рис. 6.

В качестве источника излучения *1* был использован полупроводниковый лазерный диод, генерирующий непрерывное инфракрасное излучение на длине волны 805 nm. Для преобразования расходящегося пучка в коллимированный был использован коллиматор *2*. Кол-

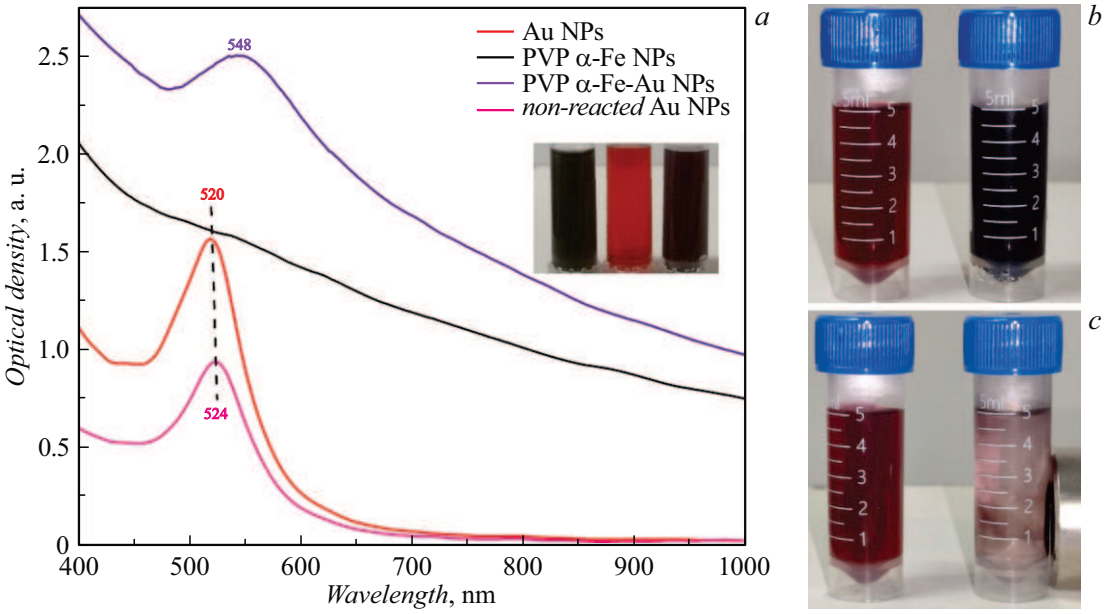

Рис. 5. Кривые оптической плотности растворов НЧ золота (красная кривая), НЧ PVP α-Fe (черная кривая), композитных НЧ PVP α-Fe–Au (фиолетовая кривая) и не вступивших в реакцию золотых НЧ (розовая кривая), на вставке фотография коллоидных растворов (слева направо: НЧ PVP α-Fe; НЧ золота; композитных НЧ PVP α-Fe–Au) (*a*); фотография коллоидных растворов золотых НЧ (слева) и композитных НЧ (справа) (*b*); фотография коллоидных растворов золотых НЧ (слева) и композитных НЧ спустя 1 min после внесения постоянного магнита (справа) (*c*).

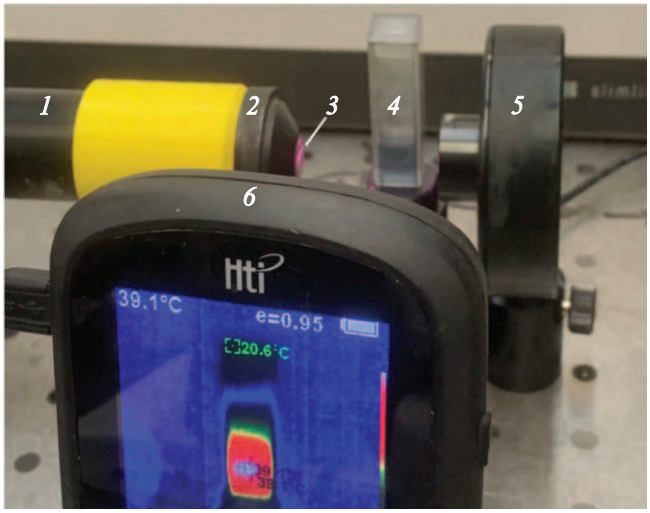

Рис. 6. Стенд для измерения фототермических свойств коллоидных растворов.

лимированный пучок *3* проходил через боковую стенку кварцевой кюветы *4* (толщина стенки 1 mm, длина оптического пути 10 mm), наполненной 1 ml коллоидного раствора. Далее проводилось измерение мощности излучения, прошедшего через кювету с раствором, для этого использовались термоэлектрический датчик *5* и измеритель мощности, в данном случае термоэлектрический датчик размещался за кюветой на расстоянии около 5 mm от ее ближайшей грани. Измерение кинетики нагрева коллоидного раствора в результате облучения производилось с помощью тепловизионной камеры *6*, показатели температуры снимались с боковой поверхности кюветы в области прохождения излучения, при этом осуществлялась видеофиксация процесса. Анализ видеозаписей с результатами тепловизионной съемки проводился с использованием программного пакета ImageJ, изменения в температуре коллоидного раствора фиксировались каждые 10 s. Температура растворов до начала облучения во всех экспериментах составляла 23 °C, изменение температуры (ΔT) рассчитывалось как разность между текущей температурой и начальным значением. В экспериментах по измерению фототермического отклика облучение осуществлялось с мощностью 0.7 W.

Кривые оптической плотности растворов НЧ и соответствующие графики зависимости изменения температуры от времени при облучении непрерывным лазерным излучением для этих растворов представлены на рис. 7. Одинаковые цвета кривых на фрагменте (рис. 7, *a*) и графиков зависимости изменения температуры на фрагментах (рис. 7, *b*, *c*) использованы специально для однозначного сопоставления оптических и фототермических свойств растворов. На рис. 7, *b* представлены графики зависимости изменения температуры от времени при облучении коллоидных растворов композитных НЧ, полученных в результате двухэтапного лазерного синтеза в соответствии с методикой, описанной в работе [18], и трехэтапного синтеза, где магнитным компонентом являлись НЧ, полученные методом лазерной абляции железа в воздухе, концентрация растворов ~ 0.6 mg/ml. Графики зависимости изменения температуры от времени при облучении коллоидных растворов НЧ PVP α-Fe и композитных НЧ PVP α-Fe–Au различной концентрации представлены на рис. 7, *c*.

Как можно наблюдать на рис. 7, *b*, динамика нагрева растворов, полученных различными способами, практически совпадает. Рост температуры составляет 10.8 °C и 10.6 °C для двухэтапного лазерного синтеза и трехэтапного синтеза соответственно. Наибольший рост температуры наблюдался в случае растворов НЧ PVP α-Fe (концентрация ~ 0.1 mg/ml) и композитных НЧ PVP α-Fe–Au (концентрация ~ 0.14 mg/ml), нагрев составил 20.9 °C и 24.2 °C соответственно. При более низкой концентрации 0.05 mg/ml для раствора НЧ PVP α-Fe и 0.07 mg/ml в случае раствора композитных НЧ PVP α-Fe–Au, в результате облучения температура увеличивалась на 14.1 °C и 16.2 °C.

Заключение

Работа демонстрирует успешную реализацию комплексного подхода к синтезу композитных магнито-плазмонных наночастиц с контролируемой структурой и свойствами. Полученные материалы обладают высоким фототермическим потенциалом и могут быть использованы в качестве многофункциональных агентов в биомедицинских и оптических приложениях. Полученные экспериментальные данные (СЭМ, результаты рентгеновской дифракции и спектрофотометрии) подтверждают возможность применения предлагаемого комбинированного подхода для создания композитных НЧ, обладающих магнитными и плазмонными свойствами. Данный подход позволяет гибко варьировать условия синтеза для получения НЧ с необходимыми свойствами.

В результате разработан универсальный комбинированный подход к синтезу композитных НЧ с конфигурацией „ядро–сателлиты“ с контролируемыми свойствами. Средний размер НЧ уменьшился от 104 до 50 nm после УЗ обработки, что свидетельствует о деагломерации и фрагментации частиц. Использование поливинилпирролидона позволило стабилизировать НЧ α-Fe и предотвратить их окисление. Рентгенофазовый анализ композитных магнито-плазмонных НЧ двух разных типов подтвердил наличие фаз магнетита/маггемита и золота, а также α-Fe и золота соответственно. Для двух типов рассматриваемых композитных НЧ наблюдается красное смещение положения плазмонного резонанса с 520 до 545 – 548 nm, что указывает на взаимодействие между золотыми и магнитными НЧ.

При облучении коллоидных растворов композитных магнито-плазмонных НЧ Fe_3O_4-Au и PVP α-Fe–Au с концентрацией 0.06 и 0.07 mg/ml непрерывным лазерным излучением на длине волны 805 nm нагрев составил

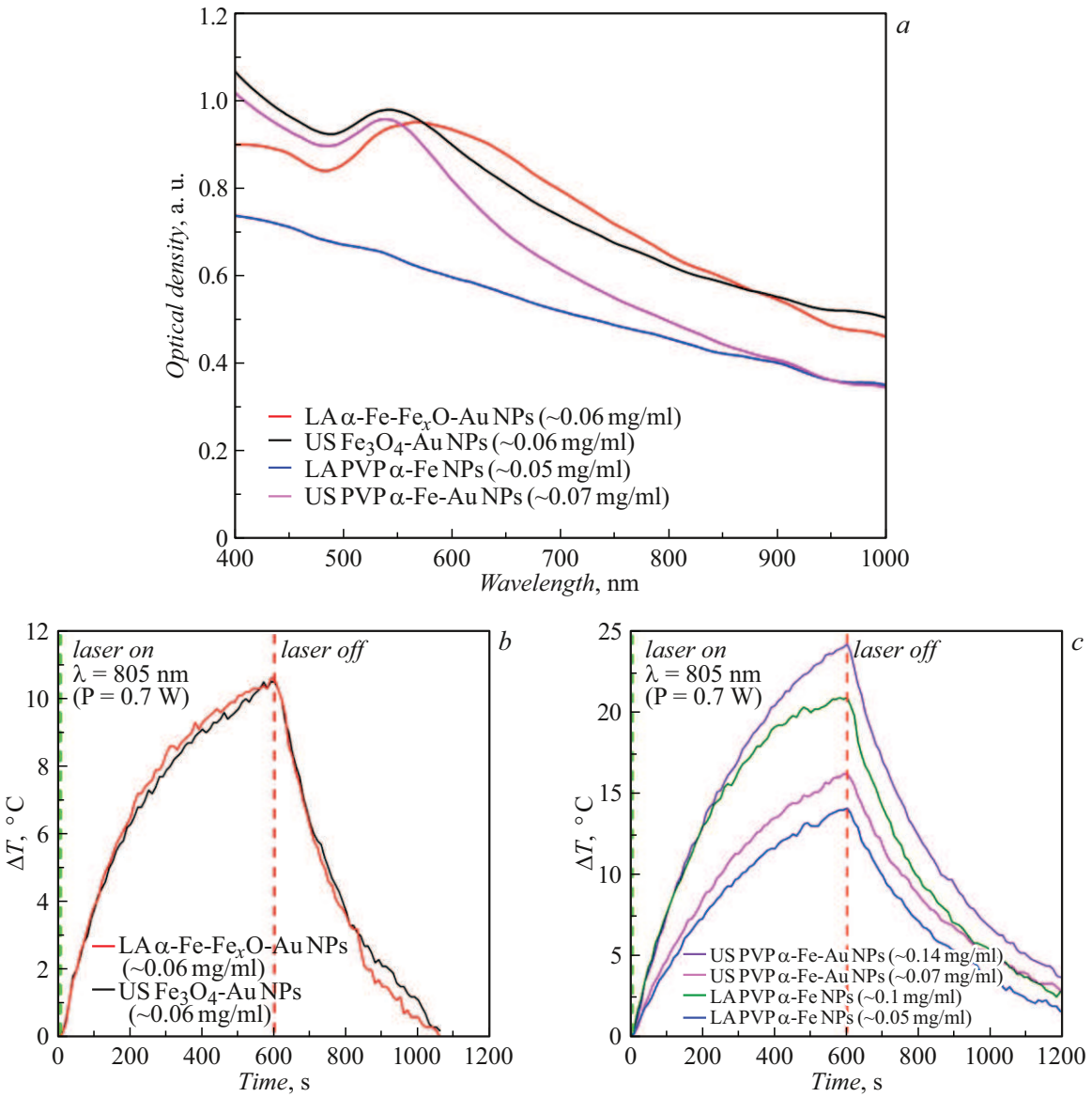

Рис. 7. Кривые оптической плотности растворов НЧ Fe–Fe$_x$O–Au (красная кривая), Fe$_3$O$_4$–Au (черная кривая), PVP α-Fe (синяя кривая) и PVP α-Fe–Au (розовая кривая) (*a*). Графики зависимости изменения температуры от времени при облучении коллоидных растворов: композитных НЧ Fe–Fe$_x$O–Au и Fe$_3$O$_4$–Au (красная и черная кривые) (*b*); НЧ PVP α-Fe (синяя и зеленая кривые) и композитных НЧ PVP α-Fe–Au (розовая и фиолетовая кривые) (*c*).

10.6 °C и 16.2 °C соответственно. Наблюдаемый фототермический отклик возрастает с увеличением концентрации растворов, что указывает на возможность регулирования степени локального нагрева — важного условия для потенциального применения в фототермической терапии.

Финансирование работы

Исследование процессов формирования наночастиц и сборка экспериментальных схем выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-20015. Подготовка и анализ образцов выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FZUN-2024-0019.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A.A. Popov, Z. Swiatkowska-Warkocka, M. Marszalek, G. Tselikov, I.V. Zelepukin, A. Al-Kattan, S.M. Deyev, S.M. Klimentov, T.E. Itina, A.V. Kabashin. Nanomaterials, **12** (4), 649 (2022). DOI: 10.3390/nano12040649

[2] P. Hu, S. Zhang, T. Wu, D. Ni, W. Fan, Y. Zhu, R. Qian, J. Shi. Adv. Mater., **30** (31), 1801690 (2018). DOI: 10.1002/adma.201801690
[3] A. Basagni, V. Torresan, P. Marzola, M.B.F. van Raap, L. Nodari, V. Amendola. Faraday Discuss., **242**, 286 (2023). DOI: 10.1039/D2FD00087C
[4] Q. Gu, J. Zhu, G.J. Weng, J.J. Li, J.W. Zhao. Microchim. Acta, **189** (12), 470 (2022). DOI: 10.1007/s00604-022-05559-0
[5] D.C. Luther, R. Huang, T. Jeon, X. Zhang, Y.W. Lee, H. Nagaraj, V.M. Rotello. Adv. Drug Deliv. Rev., **156**, 188 (2020). DOI: 10.1016/j.addr.2020.06.020
[6] A.S. Gonçalves, C.F. Rodrigues, A.F. Moreira, I.J. Correia. Acta Biomater., **116**, 105 (2020). DOI: 10.1016/j.actbio.2020.09.008
[7] S. Hossen, M.K. Hossain, M.K. Basher, M.N.H. Mia, M.T. Rahman, M.J. Uddin. J. Adv. Res., **15**, 1 (2019). DOI: 10.1016/j.jare.2018.06.005
[8] A. Mittal, I. Roy, S. Gandhi. Magnetochem., **8** (9), 107 (2022). DOI: 10.3390/magnetochemistry8090107
[9] H. Gavilán, S.K. Avugadda, T. Fernández-Cabada, N. Soni, M. Cassani, B.T. Mai, R. Chantrell, T. Pellegrino. Chem. Soc. Rev., **50** (20), 11614 (2021). DOI: 10.1039/D1CS00427A
[10] O.Y. Griaznova, I.B. Belyaev, A.S. Sogomonyan, I.V. Zelepukin, G.V. Tikhonowski, A.A. Popov, A.S. Komlev, P.I. Nikitin, D.A. Gorin, A.V. Kabashin, S.M. Deyev. Pharmaceutics, **14** (5), 994 (2022). DOI: 10.3390/pharmaceutics14050994
[11] J. Kadkhoda, A. Tarighatnia, J. Barar, A. Aghanejad, S. Davaran. Photodiagnosis Photodyn. Ther., **37**, 102697 (2022). DOI: 10.1016/j.pdpdt.2021.102697
[12] A.B. Bucharskaya, N.G. Khlebtsov, B.N. Khlebtsov, G.N. Maslyakova, N.A. Navolokin, V.D. Genin, E.A. Genina, V.V. Tuchin. Materials, **15** (4), 1606 (2022). DOI: 10.3390/ma15041606
[13] A. Sood, V. Arora, J. Shah, R.K. Kotnala, T.K. Jain. Mater. Sci. Eng. C, **80**, 274 (2017). DOI: 10.1016/j.msec.2017.05.079
[14] M. Muniz-Miranda, F. Muniz-Miranda, E. Giorgetti. Nanomaterials, **10** (1), 132 (2020). DOI: 10.3390/nano10010132
[15] N.G. Semaltianos, G. Karczewski. ACS Appl. Nano Mater., **4** (7), 6407 (2021). DOI: 10.1021/acsanm.1c00715
[16] A.A. Laktionov, I.V. Sozaev, D.I. Tselikov, G.V. Tikhonovskii, M.S. Grigor'yeva, S.M. Klimentov, I.N. Zavestovskaya, A.V. Kabashin, A.A. Popov. Bull. Lebedev Phys. Inst., **51** (Suppl 7), S602 (2024). DOI: 10.3103/S1068335624601821
[17] M. Jelić, E. Mühlhausen, M. Kamp, F. Pohl, S. Riegg, M. Wickleder, G. Beck. Nano Struct. Nano-Objects, 39, 101246 (2024). DOI: 10.1016/j.nanoso.2024.101246
[18] U.E. Kurilova, A.S. Chernikov, D.A. Kochuev, L.S. Volkova, A.A. Voznesenskaya, R.V. Chkalov, D.V. Abramov, A.V. Kazak, I.A. Suetina, M.V. Mezentseva, L.I. Russu, A.Yu. Gerasimenko, K.S. Khor'kov. Biomed. Eng., **58**, 106 (2024). DOI: 10.1007/s10527-024-10376-1
[19] А.С. Черников, Д.А. Кочуев, М.А. Дзус, А.А. Вознесенская, У.Е. Курилова, Р.В. Чкалов, А.В. Казак, А.Ю. Герасименко, К.С. Хорьков. ФТТ, **66** (12), 2210 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.12.59597.6290PA
[20] U.E. Kurilova, A.S. Chernikov, D.A. Kochuev, L.S. Volkova, A.A. Voznesenskaya, R.V. Chkalov, D.V. Abramov, A.V. Kazak, I.A. Suetina, M.V. Mezentseva, L.I. Russu, A.Yu. Gerasimenko, K.S. Khorkov. J. Biomed. Photonics Eng., **9** (2), 020301 (2023). DOI: 10.18287/JBPE23.09.020301
[21] C. Devos, A. Bampouli, E. Brozzi, G.D. Stefanidis, M. Dusselier, T. Van Gerven, S. Kuhn, Chem. Society Rev., **54** (1), 85 (2025). DOI: 10.1039/D4CS00148F
[22] E.A. Moacă, C.G. Watz, V. Socoliuc, R. Racoviceanu, C. Păcurariu, R. Ianoş, S. Cîntă-Pînzaru, L.B. Tudoran, F. Nekvapil, S. Iurciuc, C. Şoica, C.A. Dehelean. Nanomaterials, **11** (5), 1189 (2021). DOI: 10.3390/nano11051189
[23] M. Sedki, G. Zhao, S. Ma, D. Jassby, A. Mulchandani, Sensors, **21** (3), 883 (2021). DOI: 10.3390/s21030883
[24] Y. Hirano, Y. Kasai, K. Sagata, Y. Kita. Bull. Chem. Society Jpn., **89** (9), 1026 (2016). DOI: 10.1246/bcsj.20160114