

Научная статья
УДК 535.3
DOI 10.18101/2306-2363-2025-1-3-10

Исследование наночастиц серебра и железа методом комбинационного рассеяния света

© **Ершов Александр Андреевич**
ассистент,
Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79
AAErshov@sfu-kras.ru

© **Дамдинов Баир Батуевич**
доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник,
Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79;
Институт физического материаловедения СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
bdamdinov@sfu-kras.ru

Аннотация. В работе исследованы наночастицы серебра и железа методом спектроскопии комбинационного рассеяния света в температурном диапазоне 223–328 К. Для наночастиц Ag обнаружены спектральные линии, связанные с углеродными соединениями, что объясняется их взаимодействием с окружающей средой. В высокочастотной области (2780–3200 см⁻¹) зафиксированы незначительные температурные сдвиги линий, свидетельствующие об отсутствии фазовых переходов. Спектры наночастиц Fe демонстрируют характерные пики оксида железа Fe₂O₃ в низкочастотном диапазоне (60–900 см⁻¹). Полученные данные подтверждают высокую структурную стабильность исследуемых наноматериалов при температурных колебаниях. Линейный характер смещения спектральных линий указывает на устойчивость частиц к термическим воздействиям. Результаты исследования имеют важное значение для разработки термостабильных наноматериалов и их применения в различных технологических процессах.

Ключевые слова: наночастицы серебра, наночастицы железа, комбинационное рассеяние света, температурная стабильность, спектроскопия, фазовые переходы, оксид железа.

Для цитирования

Ершов А. А., Дамдинов Б. Б. Исследование наночастиц серебра и железа методом комбинационного рассеяния света // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2025. Вып. 1. С. 3–10.

Введение

В последние десятилетия наблюдается стремительный рост научного интереса к ультрадисперсным материалам, что обусловлено их уникальными характеристиками и многофункциональностью [1; 2]. Особое место среди них занимают металлосодержащие наноструктуры, демонстрирующие исключительные оптические свойства. В частности, их способность усиливать сигналы при спектраль-

ном анализе открывает новые возможности в сравнении с рутинными методиками [3; 4].

Значительный потенциал имеют коллоидные системы на основе металлических нанообъектов. Актуальной задачей представляется разработка усовершенствованных жидких композитов, содержащих оксидные наноформы металлов. Подобные составы перспективны для создания термостабильных смазочных материалов с улучшенными теплофизическими параметрами [5]. Ключевым требованием к таким системам выступает сохранение эксплуатационных характеристик в экстремальных температурных условиях.

Стоит отметить, что большинство фундаментальных исследований оптических свойств наноматериалов проводится при повышенных температурных режимах [5]. Среди современных диагностических методик особого внимания заслуживает неинвазивный подход на основе рамановского рассеяния. Благодаря своей информативности и точности этот спектроскопический метод был избран в качестве основного аналитического инструмента в проведенном исследовании.

Методика экспериментальных исследований

Регистрация спектральных характеристик серебросодержащих наноструктур выполнялась на базе ЦКП ФИЦ КНЦ СО РАН с применением высокоточного спектрометрического комплекса Horiba Jobin Yvon T64000, работающего в режиме тройной дисперсии. Исследования проводились в конфигурации backscattering с использованием полупроводникового лазерного источника с длиной волны возбуждения 532 нм.

В ходе эксперимента обеспечивалось спектральное разрешение не хуже 2 см^{-1} во всем анализируемом частотном диапазоне ($180\text{--}3200 \text{ см}^{-1}$). Температурные исследования осуществлялись в интервале от 223 до 328 К с поддержанием термической стабильности на уровне $\pm 0.1 \text{ К}$.

Анализ экспериментальных данных

Наблюдаемые модификации в спектрах комбинационного рассеяния при фазовых превращениях проявляются в виде дискретного смещения частотных характеристик, появления дополнительных пиков и закономерного изменения интенсивности сигналов при последовательных измерениях. Следует отметить, что вариабельность интенсивности отдельных спектральных компонент (рис. 1), зарегистрированная при различных температурных условиях и пространственной ориентации наночастиц, не может служить однозначным индикатором фазового перехода второго рода.

Температурная зависимость спектральных характеристик демонстрирует выраженную корреляцию с фоновыми процессами. В низкотемпературном режиме ограниченное влияние фонового рассеяния обеспечивает высокое спектральное разрешение. Однако при термоактивации наблюдается прогрессирующее расширение спектральных линий, что существенно осложняет их индивидуальный анализ, особенно в случаях, когда межпиковые расстояния оказываются меньше полуширин при низких температурах.

Для углубленного анализа спектральных закономерностей был применен метод математической деконволюции. Обработка данных проводилась в трех характерных частотных диапазонах: $180\text{--}950 \text{ см}^{-1}$ (рис. 1а), $950\text{--}1770 \text{ см}^{-1}$ (рис. 1б)

и $2780\text{--}3200\text{ см}^{-1}$ (рис. 1в). Область $1770\text{--}2780\text{ см}^{-1}$ была исключена из рассмотрения вследствие отсутствия статистически значимых сигналов выше уровня шумов. Следует подчеркнуть, что в диапазоне $180\text{--}950\text{ см}^{-1}$ проведение достоверного разделения перекрывающихся низкоинтенсивных спектральных компонент не представляется возможным.

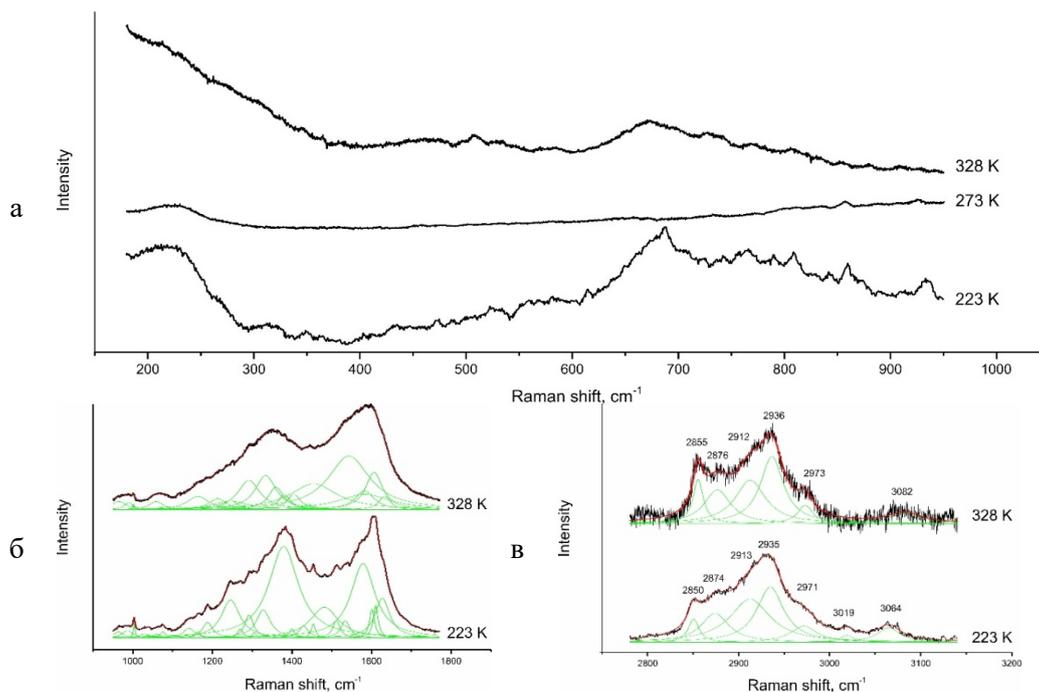


Рис. 1. Температурно-зависимые спектры КР наночастиц Ag, представленные для трех спектральных окон: (а) $180\text{--}950\text{ см}^{-1}$, (б) $950\text{--}1770\text{ см}^{-1}$ и (в) $2780\text{--}3200\text{ см}^{-1}$ (температурная шкала — справа). На вставке (в) показаны частоты основных колебательных мод. Условные обозначения: исходные данные (черный), деконволюционные компоненты (зеленый), смоделированный спектр (красный)

Ключевым аспектом при обработке спектроскопических данных является амплитуда регистрируемых сигналов. Наличие слабоинтенсивных пиков вблизи доминирующих спектральных компонент существенно снижает точность идентификации их частотных характеристик. Важным параметром также выступает соотношение полезного сигнала к шумовой составляющей — при приближении данного показателя к критическому значению (≈ 1) значительно возрастает погрешность интерпретации результатов [4].

Повышенный шумовой фон в спектрах обусловлен явлением хемосорбции в изучаемой системе. Доминирующие спектральные компоненты (рис. 1б) соответствуют колебательным модам углеродных структур [6–8]. В результате поверхностных взаимодействий серебросодержащих наночастиц с компонентами атмосферы и углеродными соединениями [9; 10] наблюдается появление множества дополнительных спектральных особенностей.

Сильные электростатические эффекты на границе раздела наночастиц Ag с адсорбированными элементами [10] приводят к модификации характеристических колебаний, что исключает возможность наблюдения "чистых" серебряных мод в спектрах.

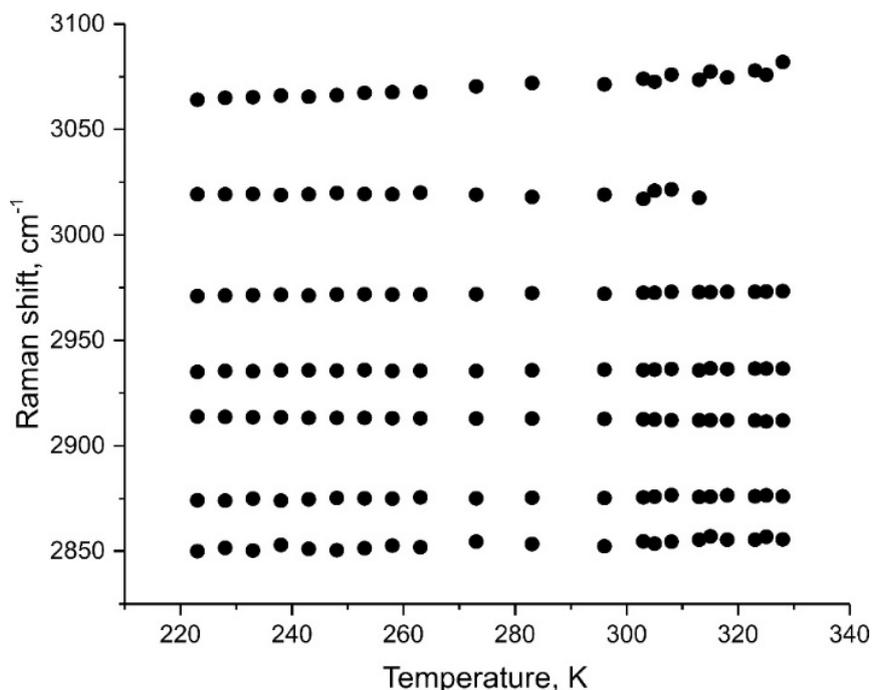


Рис. 2. Зависимость положения спектральных линий КР от температуры

Наиболее четкие спектральные закономерности наблюдаются в высокочастотной области ($2780\text{--}3200\text{ см}^{-1}$). Для данного диапазона был проведен анализ температурных сдвигов рамановских линий (рис. 2). Экспериментальные данные демонстрируют незначительные частотные смещения без появления новых спектральных компонент. Исчезновение пика при 3019 см^{-1} при $T = 313\text{ К}$ объясняется снижением его интенсивности ниже порога шумовой чувствительности. Максимальный температурный сдвиг наблюдается для наиболее высокочастотной моды, при этом погрешность определения её положения в условиях термического воздействия и шумовых помех достигает 7 см^{-1} .

Примененная методика была адаптирована для изучения наночастиц Fe (рис. 3). Высокая химическая активность железа приводит к быстрому образованию оксидного слоя (Fe_2O_3) при контакте с атмосферой, что существенно затрудняет регистрацию характеристических колебаний чистого металла. В низкочастотной области (ниже 350 см^{-1}) преобладают колебательные моды, связанные с атомами железа, тогда как диапазон $350\text{--}900\text{ см}^{-1}$ соответствует колебаниям кислородных связей. Область выше 900 см^{-1} исключена из анализа вследствие отсутствия значимых спектральных особенностей (рис. 4).

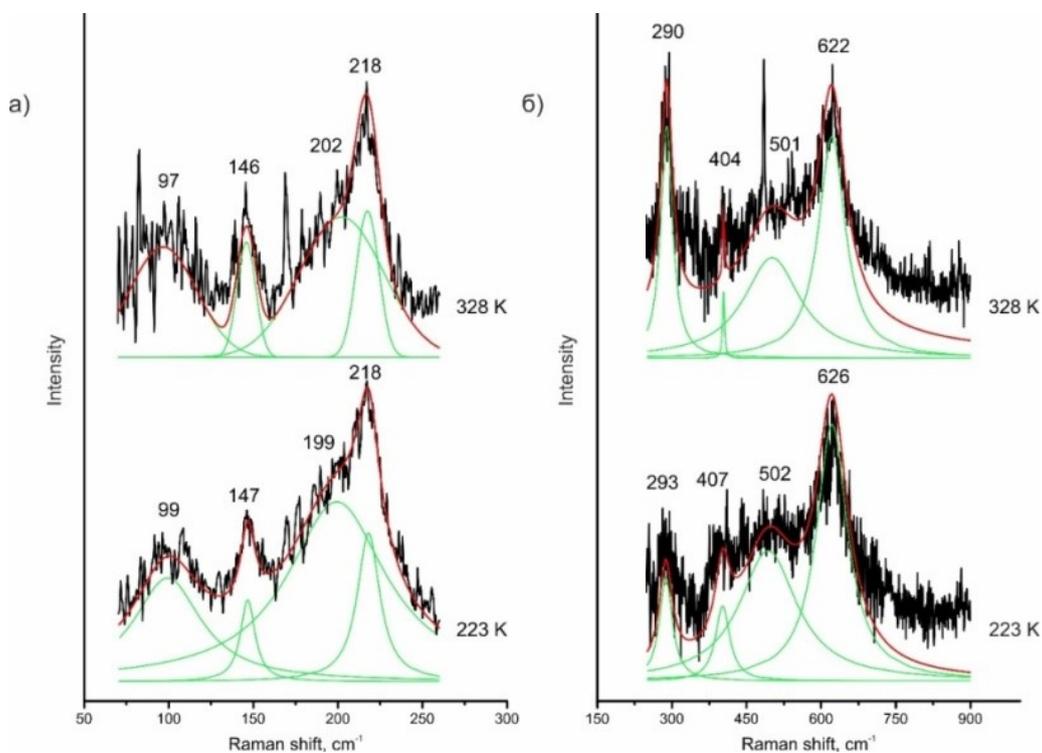


Рис. 3. Температурная эволюция спектров КР наночастиц Fe, зафиксированная в различных частотных областях: (а) $60\text{-}260\text{ см}^{-1}$ и (б) $250\text{-}900\text{ см}^{-1}$. Значения температур приведены в правой части графиков

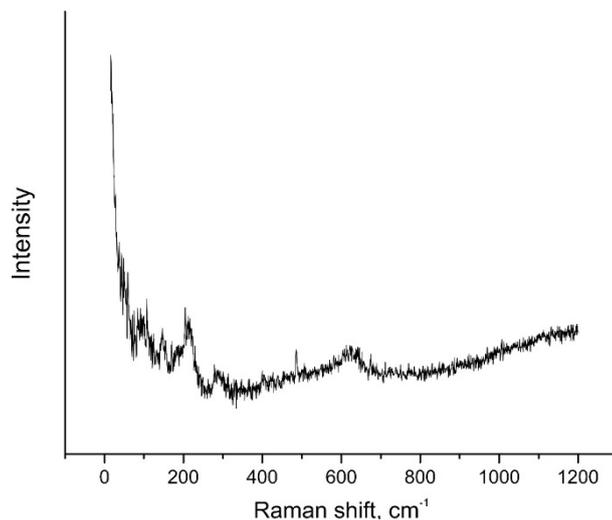


Рис. 4. Спектр комбинационного рассеяния наночастиц железа при комнатной температуре

При спектроскопическом анализе выявлено четкое соответствие между наблюдаемыми колебательными модами и их симметрией. Колебательные процес-

сы с частотами 218 и 501 см^{-1} характеризуются симметрией типа A_{1g} , тогда как частоты 146, 202, 290, 404 и 622 см^{-1} соответствуют колебаниям с E_g -симметрией.

В низкочастотной области спектра (около 100 см^{-1}) проведение точного анализа осложнено существенным преобладанием шумового фона над полезным сигналом. Это ограничение приводит к невозможности достоверного разделения спектральных линий при различных температурных режимах, что особенно заметно при попытке разрешения близко расположенных пиков.

Исследование температурных зависимостей показало отсутствие значимых изменений в положении спектральных максимумов во всем изученном диапазоне температур. Наблюдаемые частотные сдвиги имеют строго линейный характер, что в совокупности с сохранением структурной целостности наночастиц серебра и железа [11] свидетельствует об отсутствии фазовых превращений.

Полученные результаты убедительно демонстрируют исключительную стабильность исследуемых наноматериалов в условиях, характерных для сибирского климата. Такие температурно-устойчивые свойства делают данные наночастицы перспективными компонентами для создания различных суспензионных систем с заданными характеристиками.

Заключение

Проведенные исследования демонстрируют устойчивое поведение спектральных характеристик наночастиц серебра и железа в изученном температурном диапазоне от 223 до 328 К. Отсутствие существенных изменений в положении спектральных максимумов, а также линейный характер их температурных смещений убедительно свидетельствуют о сохранении фазового состояния и структурной целостности исследуемых наноматериалов.

Полученные экспериментальные данные подтверждают высокую стабильность наночастиц Ag и Fe при температурных воздействиях, что позволяет рассматривать их как перспективные компоненты для создания технологических суспензий [12]. Особое значение имеет выявленная устойчивость материалов к климатическим колебаниям, характерным для различных географических зон.

Результаты работы имеют важное прикладное значение для разработки новых композитных материалов с контролируемыми свойствами, сохраняющих стабильность в условиях переменных температурных воздействий. Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть направлены на оптимизацию состава и свойств нанодисперсных систем для конкретных технологических применений.

Литература

1. Kora A. J. Jayaraman arunachalam green fabrication of silver nanoparticles by gum tragacanth (*Astragalus gummifer*): a dual functional reductant and stabilizer. *J. of Nanomaterials*. 2012: 1–8.
2. Синтез, структура и магнитные свойства наночастиц железа и никеля, капсулированных в углерод / В. А. Цурин, А. Е. Ермаков, М. А. Уймин [и др.] // Физика твердого тела. 2014. № 2. С. 287–300. Текст: непосредственный.
3. Модификация поверхности плазмонных наноструктур для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния биомолекул / Б. В. Ранищенко, Г. Исич, П. Мойзес [и др.]

А. А. Ершов, Б. Б. Дамдинов. Исследование наночастиц серебра и железа методом комбинированного рассеяния света

др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом: труды XIII Международной конференции. Минск: Изд-во БелГУ, 2019. С. 485–488. Текст: непосредственный.

4. Набиев И. Р. Гигантское комбинационное рассеяние и его применение к изучению биологических молекул / И. Р. Набиев, Р. Г. Ефремов, Г. Д. Чуманов // Успехи физических наук. 1988. № 3. С. 459–496. Текст: непосредственный.

5. Zhao S.Y., Li X., Mei Y.H., Lu G.Q. Novel interface material used in high power electronic die-attaching on bare Cu substrates. *J Mater Sci: Mater Electron*. 2016; 27: 10941–10950.

6. Dennison J., Holtz M., Swain G. Raman spectroscopy of carbon materials. *J Mater Sci: Spectroscopy*. 1996; 7: 38–48.

7. Chow K. K., Short M., Lam S., McWilliams A., Zeng H. A. Raman cell based on hollow core photonic crystal fiber for human breath analysis. *J Med. Phys*. 2014; 9: 092701.

8. Valmalette J. C., Tan Z., Abe H., Ohara S. Raman scattering of linear chains of strongly coupled Ag nanoparticles on SWCNTs. *Scientific Reports*. 2014; 4: 1–8.

9. Decreau R. A., Collman J. P. Three toxic gases meet in the mitochondria. *Frontiers in Physiology*. 2015; 6: 210.

10. Cai Y., Piao X., Gao W., Zhang Zh., Nica E., Sun Zh. Large-scale and facile synthesis of silver nanoparticles via a microwave method for a conductive pen. *J. The Royal Soc. Of Chem*. 2017; 54: 34041–34048.

11. Damdinov B. B., Ershov A. A., Mitygov C. M., Maximova O. A., Haruk G. N. Temperature Resistance of Silver and Iron Nanoparticles. *J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys*. 2024; 4: 497–505.

12. Акустическое исследование сдвиговых вязкоупругих свойств коллоидных суспензий наночастиц / Т. С. Дембелова, А. Б. Цыренжапова, Д. Н. Макарова [и др.] // Ученые записки физ. фак-та Моск. ун-та. 2014. № 5. С. 145301. Текст: непосредственный.

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 24.06.2025.

Study of Silver and Iron Nanoparticles Using Raman Scattering Spectroscopy

Aleksandr A. Ershov

Assistant

Siberian Federal University

79 Svobodniy pereulok, Krasnoyarskiy Krai, 660041 Krasnoyarsk, Russia

AAErshov@sfu-kras.ru

Bair B. Damdinov

Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Prof., Senior Researcher

Siberian Federal University

79 Svobodniy pereulok, Krasnoyarskiy Krai, 660041 Krasnoyarsk, Russia

Institute of Physical Material Science SB RAS

6 Sakhyanovoy St., 670047 Ulan-Ude, Russia

bdamdinov@sfu-kras.ru

Abstract. The article investigates silver and iron nanoparticles using Raman scattering spectroscopy across a temperature range of 223–328 K. For Ag nanoparticles, spectral lines associated with carbon compounds were detected, which is attributed to their interaction with the surrounding environment. In the high-frequency region (2780–3200 cm⁻¹), slight temperature shifts in the lines were observed, indicating the absence of phase transitions.

The spectra of Fe nanoparticles revealed characteristic peaks of iron oxide (Fe_2O_3) in the low-frequency range ($60\text{--}900\text{ cm}^{-1}$). The results confirm the high structural stability of the studied nanomaterials under temperature variations. The linear nature of the spectral line shifts suggests strong resistance of the particles to thermal effects. These findings are significant for the development of thermally stable nanomaterials and their application in various technological processes.

Keywords: silver nanoparticles, iron nanoparticles, Raman scattering, thermal stability, spectroscopy, phase transitions, iron oxide.

For citation

Ershov A. A. Damdinov B. B. Study of Silver and Iron Nanoparticles Using Raman Scattering Spectroscopy. *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics.* 2025; 2: 3–10 (in Russ.).

The article was submitted 16.06.2025; approved after reviewing 24.06.2025; accepted for publication 24.06.2025.