

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К АГРЕГАЦИИ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ БОРГИДРИДНОГО СИНТЕЗА

Бакал В.А. (СГУ имени Н.Г.Чернышевского),

Прихожденко Е.С. (СГУ имени Н.Г.Чернышевского)

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук,
доцент Прихожденко Е.С. (СГУ имени Н.Г.Чернышевского)

Введение. Наночастицы серебра обладают уникальными физико-химическими свойствами, включая локализованный поверхностный плазмонный резонанс [1], высокую удельную поверхность, каталитическую активность [2] и антибактериальные свойства [3]. Эти характеристики делают их перспективными для применения в сенсорики, биомедицине, катализе. Одним из наиболее распространенных методов получения является химическое восстановление солей серебра (AgNO_3 , AgClO_4 , AgCH_3COO) в водных или водно-органических средах [4,5]. Восстановителями могут выступать гидразин, гидроксилламин, аскорбиновая кислота, альдегиды, спирты, однако особый интерес представляет боргидрид натрия (NaBH_4) [6], который обеспечивает не только высокую скорость восстановления и контроль морфологии частиц, но и их стабилизацию за счет адсорбции BH_4^- на поверхности. Для предотвращения агрегации наночастиц и регулирования их размеров используются стабилизаторы, такие как поверхностно-активные вещества [7], желатин [8] и хитозан [9]. Несмотря на высокий потенциал наночастиц серебра, ключевой задачей остается разработка методологии контролируемого синтеза с воспроизводимыми характеристиками. В частности, важными аспектами являются управление агрегацией наночастиц, изучение влияния параметров среды (рН, ионная сила) на их структуру.

Основная часть. Синтез наночастиц серебра проводился методом боргидридного восстановления нитрата серебра в водной среде. В результате был получен коллоидный раствор наночастиц серебра с максимумом оптического поглощения при $\lambda_{\text{max}} \approx 400$ нм. Варьирование концентраций восстановителя и нитрата серебра приводило к батохромному сдвигу. Экспериментально установлено, что полученный боргидридным методом раствор наночастиц сохраняет стабильность в течение более 3 часов, демонстрируя незначительное изменение положения пика поглощения (сдвиг на 2 нм). Это позволяет использовать его в качестве исходного материала для формирования наночастиц различной морфологии. Однако при разбавлении раствора водой (в соотношениях 1:1 и 1:2) наблюдалось уширение пика и его смещение в длинноволновую область, что обусловлено снижением электростатической стабилизации и последующим ростом частиц.

Исследование влияния рН на морфологию показало, что при добавлении раствора NaOH (0,01–1 М) к «зародышам» наблюдается изменение формы частиц. При $\text{pH} > 8$ происходил переход от сфер к более сложным структурам, что сопровождалось появлением продольного плазмонного резонанса в диапазоне 500–700 нм. Добавление 0,1 М NaOH способствовало частичному восстановлению сферической формы частиц через 30 минут, тогда как при концентрации 0,01 М этот процесс происходил быстрее – в течение 20 минут. Дополнительно проведены измерения дзета-потенциала, значения которого варьировались от -17 до -38 мВ в зависимости от количества восстановителя. Гидродинамический радиус частиц составил 80–120 нм, что соответствует данным, полученным при анализе их спектральных характеристик.

Выводы. В ходе работы был получен стабильный коллоидный раствор наночастиц серебра. Исследование влияния различных факторов, таких как концентрация восстановителя, рН и разбавление раствора, позволило установить условия, при которых можно контролировать морфологию и стабильность наночастиц. Для дальнейших исследований

можно использовать зародыши серебра, которые подходят для нанесения их на полимерные подложки или проведения синтеза *in situ* с изменением морфологии и осаждения агрегатов серебра. Одним из перспективных направлений применения таких модифицированных полимерных покрытий является создание ГКР-подложек, обеспечивающих детекцию низких концентраций аналитических веществ, включая биомаркеры заболеваний[10,11,12].

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) №22-79-10270.

Список использованных источников:

1. Низамов Т. Р. Синтез и химическое модифицирование поверхности анизотропных наночастиц серебра // Автореф. дисс.... канд. хим. наук. М.: МГУ. – 2014.
2. Xu R., Wang D., Zhang J., Li Y. Shape-dependent catalytic activity of silver nanoparticles for the oxidation of styrene // Chemistry – An Asian Journal. — 2006. — Vol. 1, № 6. — P. 888–893.
3. Kim S.-H., Lee H.-S., Ryu D.-S., Choi S.-J., Lee D.-S. Antibacterial activity of silver nanoparticles against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* // Microbiology and Biotechnology Letters. — 2011. — Vol. 39, № 1. — P. 77–85.
4. Pandey P. C., Singh R. Controlled synthesis of functional silver nanoparticles dispersible in aqueous and non-aqueous medium // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. — 2015. — Vol. 15, № 8. — P. 5749–5759.
5. Lee K. J., Lee S. H., Park S. H., Lee K. Y., Lee S. G., Han S. W. Environmentally friendly synthesis of organic-soluble silver nanoparticles for printed electronics // Nanotechnology. — 2007. — Vol. 18, № 33. — P. 335601.
6. Creighton J. A., Blatchford C. G., Albrecht M. G. Plasma resonance enhancement of Raman scattering by pyridine adsorbed on silver or gold sol particles of size comparable to the excitation wavelength // Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2: Molecular and Chemical Physics. — 1979. — Vol. 75. — P. 790–798.
7. Popovetskiy P., et al. Electrophoretic mobility of silver nanoparticles stabilized with nonionic surfactant Ecosurf SA4: Origin of charged particles, concentration by electrophoresis and production of conductive coatings // Journal of Molecular Liquids. — 2023. — Vol. 374. — P. 121273.
8. Kubendiran L., et al. In vitro preparation of biosurfactant based herbal-nano topical ointment from *Tridax procumbens* infused oil using gelatin stabilized silver nanoparticle and its efficacy on fibroblastic cell lines // Applied Nanoscience. — 2023. — Vol. 13, № 1. — P. 719–734.
9. Голиков И. В., и др. Синтез и исследование свойств коллоидного раствора наночастиц серебра // Научно-технический вестник Поволжья. — 2011. — № 1. — С. 38–40.
10. Li Z., Luo Y., Song Y., Zhu Q., Xu T., Zhang X. One-click investigation of shape influence of silver nanostructures on SERS performance for sensitive detection of COVID-19 // Analytica Chimica Acta. — 2022. — Vol. 1234. — P. 340523.
11. Yu D., Li Y., Zhang X., et al. SERS-based immunoassay enhanced with silver probe for selective separation and detection of Alzheimer's disease biomarkers // International Journal of Nanomedicine. — 2021. — Vol. 16. — P. 1901–1911.
12. Wang D., et al. Polydopamine stabilizes silver nanoparticles as a SERS substrate for efficient detection of myocardial infarction // Nanoscale. — 2022. — Vol. 14, № 16. — P. 6212–6219.