УДК 539.21, 621.3

РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА ДЛЯ ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА 520–720 нм

И.И. Фасхутдинова[@], А.С. Михайлов, Б.И. Шапиро

Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: fashutdinova93@mail.ru

Изучен синтез наночастиц золота в реакции восстановления золотохлористоводородной кислоты органическими восстановителями – формалином, цитратом натрия, гидрохиноном. Показано, что в зависимости от концентрации реагентов, температуры и типа восстановителя наблюдается изменение положения максимума плазмонной полосы в широком интервале от 520 до 720 нм. Разработан одностадийный метод синтеза длинноволновых плазмонных наночастиц золота (восстановитель – гидрохинон) с полосой поглощения в красной области спектра. Их коллоидная стабильность обеспечивается природным полимером – желатином, а также поверхностно-активными веществами: полидиметилдиаллиламмонийхлоридом и цетилтриметиламмонийбромидом.

Ключевые слова: *наночастицы, золотые наночастицы, плазмонные наночастицы, синтез плазмонных наночастиц, стабилизация золотых золей, стабилизаторы.*

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR THE SYNTHESIS OF PLASMONIC GOLD NANOPARTICLES FOR A WIDE SPECTRAL REGION 520–720 nm

I.I. Faskhutdinova[@], A.S. Mikhailov, B.I. Shapiro

Moscow Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia
[@]Corresponding author e-mail: fashutdinova93@mail.ru

A method of the synthesis of plasmon gold nanoparticles by the reduction of $HAuCl_4$ with organic reductants, such as formalin, sodium citrate and hydroquinone has been studied. It is shown that, depending on the concentration of the reagents, the temperature of synthesis and the type of the reducing agent, the position of the maximum of the plasmon band varies in a wide range from 520 nm to 720 nm. A one-stage method using hydroquinone as a reducing agent for the synthesis of long-wave plasmonic gold nanoparticles that form agglomerates of smaller particles with a plasmon absorption band in the red region of the spectrum is proposed. Since the resulting sol is rapidly precipitated due to the aggregation processes, it has been found necessary to use stabilizers for its subsequent application. The influence of some stabilizers (gelatin, as well as surface-active substances polydimethyldiallylammonium chloride and cetyltrimethylammonium bromid) on the stability of the gold sol synthesized by the hydroquinone method has been studied. It is shown that all the types of investigated stabilizers even in a minimal quantity provide the colloidal stability of the sol for several hours. However, only a natural polymer, gelatin, stabilizes the sol so that the maximum absorption of the plasmon band remains in the long-wavelength region of the spectrum.

Keywords: *nanoparticles, gold nanoparticles, plasmon nanoparticles, synthesis of plasmon nanoparticles, stabilization of gold sols, stabilizers.*

Введение

Большой объем исследований, проводимых в настоящее время с наночастицами серебра и золота [1−5], обусловлен уникальным сочетанием их свойств, таких, как антибактериальная и каталитическая активность, способность интенсивно поглощать свет, связанная с поверхностным плазмонным резонансом, и ряд других. Сегодня наночастицы серебра и золота применяются для решения проблем дальнейшей миниатюризации микрочипов, в создании нанороботов, способных доставлять лекарственные препараты к больному органу или концентрироваться в нем для последующего воздействия лазерным излучением. В последнем поколении телевизионных экранов фирмы «Samsung» с высочайшим качеством изображения используются плазмонные частицы золота [6].

Для синтеза наночастиц серебра и золота применяются различные способы, в частности, химические, фотохимические, радиолитические. Выбор того или иного способа синтеза обусловлен, в основном, спектральными характеристиками, требованиями к чистоте получаемых золей и условиями их последующего использования. Очень важным фактором для последующего применения наночастиц является коллоидная стабильность, которая зависит, в первую очередь, от их размеров. Как правило, чем крупнее размер частицы, тем больше, при прочих равных условиях, вероятность ее седиментации. С другой стороны, стабильность изначально высокодисперсных золей может быть невелика из-за протекания процессов агрегации частиц и их последующего осаждения. Стабилизация золей является одним из факторов, определяющих их последующее использование, поскольку в ряде случаев некоторые способы синтеза или стабилизации не могут быть в принципе использованы из-за токсичности получаемого золя, недостаточной концентрации частиц металла в растворе или по каким-либо иным причинам.

Уникальность наночастиц металлов проявляется в интенсивном поглощении света, обусловленном плазмонным резонансом. При этом только для трех металлов – золота, серебра и меди плазмонная частота наночастиц располагается в видимой области спектра, тогда как плазмонная частота наночастиц других металлов находится в УФ-области [7]. Таким образом, именно наночастицы указанных металлов вызывают наибольший интерес исследователей, поскольку различия в структуре этих частиц позволяют проводить «настройку» поглощения на определенную длину волны [8, 9].

Если на основе наночастиц определенного размера создать трехслойную структуру, включающую дополнительно органическую стабилизирующую прослойку и высокоупорядоченную структуру J-агрегата полиметинового красителя, то такая композиция будет обладать уникальными свойствами, обусловленными поверхностным плазмонным резонансом металлического ядра системы. В этом случае на спектральной кривой будет наблюдаться не селективное поглощение, а провал поглощения, минимум которого будет зависеть от строения металлического ядра и типа используемого полиметинового красителя, образующего на поверхности металлической частицы соответствующий J-агрегат. Подобный антирезонанс представляет интерес в интенсивно развивающейся нанофотонике для обработки информации [10]. Следует отметить, что максимум поглощения коллоидных растворов наночастиц серебра сферической формы находится в области 380–410 нм, а золота − в области 520–540 нм. Поэтому исследование трехслойных композитов на основе J-агрегатов ранее было ограничено относительно коротковолновыми красителями с максимумом поглощения не далее 540–560 нм. Для изучения J-агрегатов более длинноволновых красителей необходимо иметь золи наночастиц золота и серебра с максимумами поглощения в диапазоне 600–800 нм. Для получения золотых наночастиц с длинноволновым поглощением были разработаны многостадийные методы получения частиц не традиционной сферической формы, а имеющих стержнеобразную форму [11−13]. Спектры таких золей имеют две полосы поглощения: коротковолновую, в диапазоне 510−540 нм, и более длинноволновую, вплоть до 800 нм, в зависимости от осевого соотношения длины и ширины наночастицы. Поскольку технология получения золотых наночастиц с длинноволновой зоной поглощения достаточно сложна и трудоемка, представлялось целесообразным рассмотреть возможности более простых способов их синтеза.

Описываемые рядом авторов методы синтеза золотых наночастиц опираются либо на способ Туркевича [1], заключающийся в восстановлении золотохлористоводородной кислоты цитратом натрия, либо на боргидридный способ. Оба эти восстановителя обладают также и стабилизирующими свойствами, создавая на поверхности частиц электростатический заряд. Однако регулирование роста частиц с использованием подобных восстановителей нередко становится довольно проблематичным. В настоящее время широко применяются способы двухстадийного синтеза наночастиц с использованием на первой стадии процесса зародышеобразования и дальнейшего их роста на последующей стадии до требуемых размеров и конфигурации.

Целью настоящей работы являлась разработка одностадийного синтеза плазмонных наночастиц золота с максимумом спектрального поглощения в красной и ближней ИК-области спектра.

Экспериментальная часть

В работе использовали золотохлористоводородную кислоту $H[AuCl_4]\cdot 4H_2O$ в виде препарата квалификации «х.ч.». Поверхностно-активные вещества цетилтриметиламмонийбромид (CTAB) и полидиметилдиаллиламмонийхлорид (PDDA) являлись препаратами фирмы Sigma-Aldrich Co и ОАО «Каустик» (г. Стерлитамак), соответственно. Для стабилизации золей использовали фотографический желатин квалификации «Инертный».

Наночастицы золота получали путем восстановления $H[AuCl_4]$ в водном растворе, в качестве восстановителей служили широко известные формалин, цитрат натрия и гидрохинон.

Формалиновый метод (А). К 0.5 мл $4\cdot10^{-4}$ М водного раствора $H[AuCl_4]$, смешанного с 10.0 мл бидистиллированной воды, добавляли 0.3 мл 0.2 М раствора углекислого натрия, после чего смесь охлаждали до температуры +10 °С. Затем вводили 1.0 мл $3.3\cdot10^{-1}$ М раствора формалина и выдерживали реакционную смесь при комнатной температуре до появления окраски.

Цитратный метод (Б). К 3.3 мл $4\cdot10^{-4}$ М раствора $H[AuCl_4]$, смешанного с 10.0 мл бидистиллированной воды, добавляли 0.4 мл 0.1 М раствора цитрата натрия, смешанного с 1.0 мл бидистиллированной воды. Полученную смесь выдерживали при комнатной температуре до появления окраски.

Гидрохиноновый метод (В). К 0.5 мл $4\cdot10^{-4}$ М раствора $H[AuCl_4]$, смешанного с 5.0 мл бидистиллированной воды, добавляли 0.13 мл $9\cdot10^{-2}$ М раствора гидрохинона, после чего смесь выдерживали при комнатной температуре до появления окраски.

Спектры поглощения синтезированных золей регистрировали на спектрофотометре марки OceanOptics 2000+ (США). Обработку электронных спектров осуществляли с помощью программного обеспечения OriginPro 8.6. Толщину кювет при измерениях спектров варьировали от 1.0 до 0.15 см в зависимости от оптической плотности растворов.

Размеры и форму наночастиц определяли на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss NVision 40-38-50 (Германия).

Результаты и их обсуждение

Изучено влияние концентрации восстановителя на спектральные характеристики наночастиц золя. Из данных, представленных на рис. 1, следует, что наибольшее смещение в длинноволновую область характерно для золотых наночастиц, полученных восстановлением кислоты гидрохиноном при его концентрации, близкой к использующейся в стандартной методике (см. рис. 2В, кривая 2).

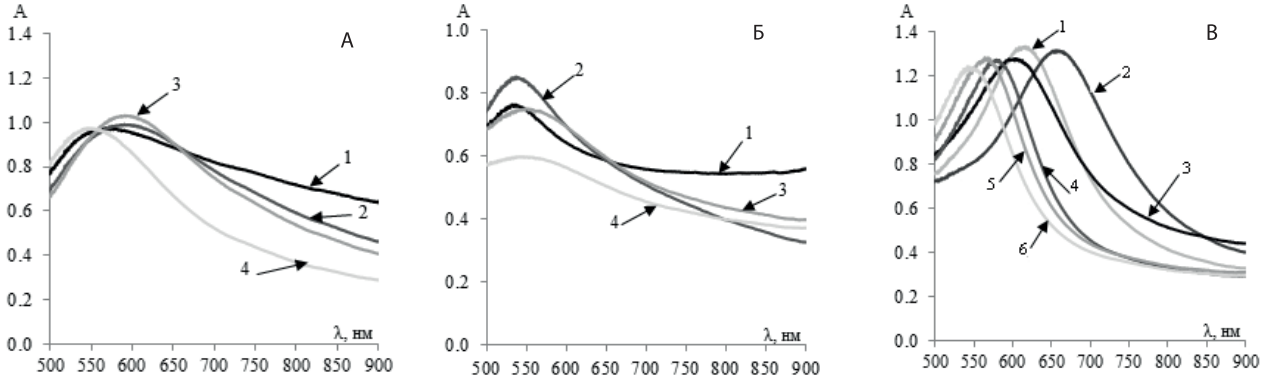

Рис. 1. Спектры поглощения золотого золя, полученного с различными количествами, моль:
А – формалина (1 – $1.7\cdot10^{-4}$; 2 – $3.3\cdot10^{-4}$; 3 – $5\cdot10^{-4}$; 4 – $6.7\cdot10^{-4}$);
Б – цитрата натрия (1 – $2.5\cdot10^{-5}$; 2 – $4\cdot10^{-5}$; 3 – $5.6\cdot10^{-5}$; 4 – $7.5\cdot10^{-5}$);
В – гидрохинона (1 – $5.5\cdot10^{-6}$; 2 – $1.2\cdot10^{-5}$; 3 – $2.3\cdot10^{-5}$; 4 – $4.5\cdot10^{-5}$; 5 – $9.1\cdot10^{-5}$; 6 – $2.7\cdot10^{-4}$).
Кривые 2 соответствуют образцам золей, полученным по стандартным методикам

С целью установления влияния температурного фактора на спектральные характеристики наночастиц золота по результатам вышеприведенных опытов выбраны оптимальные количества восстановителей: формальдегид (А) - $3.3\cdot10^{-4}$ моль (1.0 мл $3.3\cdot10^{-1}$ М раствора); цитрат натрия (Б) - $4\cdot10^{-5}$ моль (0.4 мл 0.1 М раствора); гидрохинон (В) - $1.2\cdot10^{-5}$ моль (0.13 мл $9\cdot10^{-2}$ М раствора) в расчете на синтез по стандартной методике. Все синтезы с каждым из указанных восстановителей проводили при различных температурах в диапазоне 10–100 °С. Результаты экспериментов представлены на рис. 2. Как видно, имеет место тенденция смещения максимума поглощения золя в более коротковолновую область спектра при повышении температуры синтеза. С точки зрения достижения наибольшей длины волны поглощения, наиболее подходящей температурой синтеза золя формалиновым и гидрохиноновым методами является 20 °С, тогда как для цитратного метода оптимальна температура 40 °С. Так, например, для указанных температур с использованием формальдегида достигается максимум поглощения λ_{max} = 570 нм, а для гидрохинона – λ_{max} = 733 нм. Цитратный метод при 40 °С позволяет получить максимум поглощения золя λ_{max} = 534 нм.

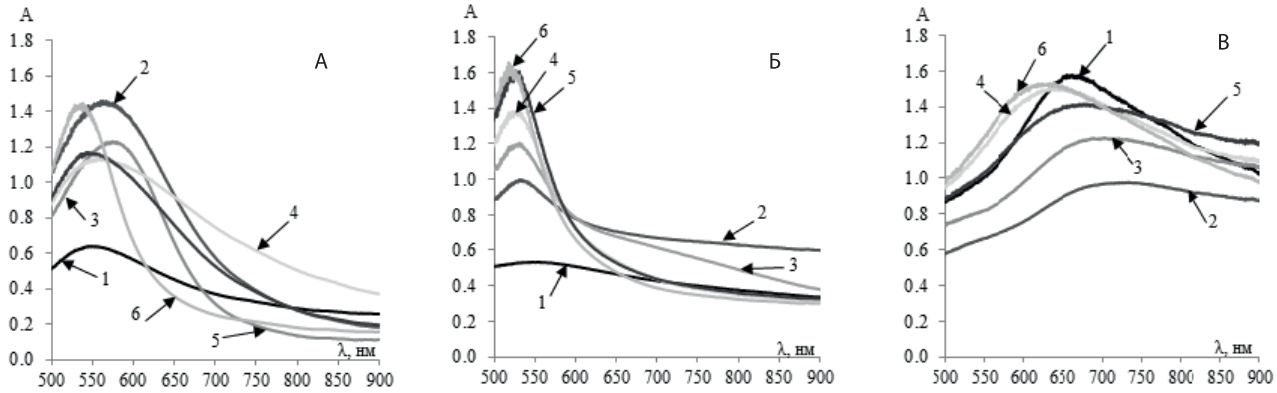

Рис. 2. Спектры поглощения золотого золя, синтезированного формалиновым (А), цитратным (Б) и гидрохиноновым (В) методами при различных температурах:
1 – 10 °С; 2 – 20 °С; 3 – 40 °С; 4 – 60 °С; 5 – 80 °С; 6 –100 °С.
Толщина кюветы при измерениях для методов: А – 1 см; Б – 0.15 см, В – 1 см.

Восстановление $H[AuCl_4]$ гидрохиноном позволяет получить наночастицы с длинноволновым максимумом поглощения, однако в отношении стабильности золя этот метод не является оптимальным. Кроме того, нами отмечено, что при недостаточных концентрациях гидрохинона (когда его концентрация ниже или близка к стехиометрической) воспроизводимость синтеза ухудшается. Одной из причин нестабильности золя, синтезированного с использованием гидрохинона, можно считать малое значение заряда наночастиц, как это видно из данных рис. 3, на котором представлены дзета-потенциалы золей, полученных тремя методами.

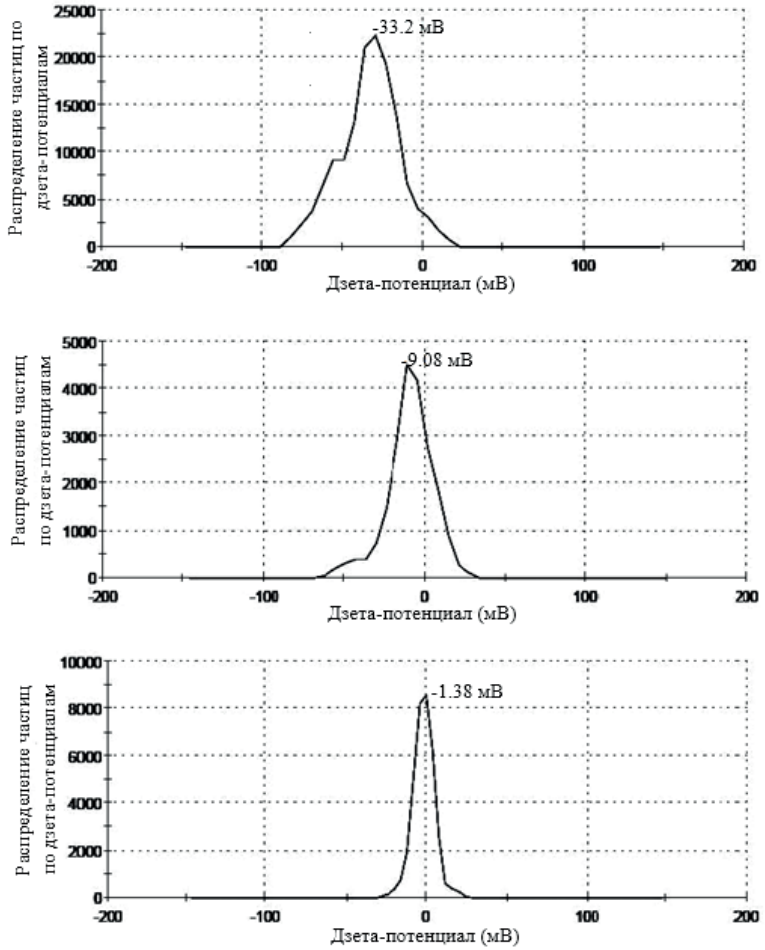

Рис. 3. Значения дзета-потенциалов для золей золота, синтезированных различными методами (сверху вниз): формалиновым, цитратным и гидрохиноновым.

Исходя из вышесказанного, целесообразно рассмотреть возможность повышения устойчивости золя золота при помощи коллоидных стабилизаторов. Для проведения экспериментов использовали три типа стабилизаторов:

- желатин в виде 5%-го водного раствора;
- полимер PDDA в виде 0.1%-го водного раствора;
- CTAB в виде 0.5%-го водного раствора.

Переменные количества каждого из указанных стабилизаторов вводили в золь сразу же после синтеза, после чего измеряли кинетику выстаивания стабилизированного золя в течение нескольких часов при комнатной температуре. Результаты экспериментов представлены на рис. 4 (стабилизация желатином), 5 (стабилизация CTAB) и 6 (стабилизация PDDA).

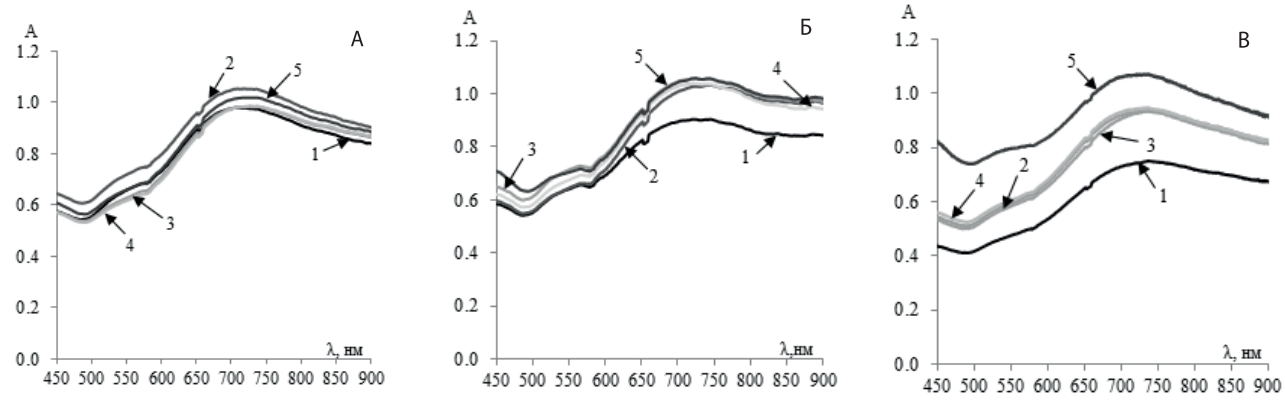

Рис. 4. Спектры поглощения золотого золя, синтезированного гидрохиноновым методом, стабилизированного различным количеством желатина в виде 5%-го раствора (1 – без желатина; 2 – 0.14 мл; 3 – 0.35 мл; 4 – 0.7 мл; 5 –1.4 мл), снятые сразу после синтеза (А); через 1 ч после синтеза (Б) и через 4 ч после синтеза (В). Толщина кюветы во всех опытах 1 см.

Очевидно (рис. 4), что в течение первого часа выстаивания оптическая плотность D золя, стабилизированного желатином, имеет слабовыраженную тенденцию к росту, а затем, после 4 ч выстаивания, несколько снижается, максимум поглощения незначительно сдвигается при этом в более длинноволновую область спектра. Наибольшую устойчивость золь имеет в опыте 5, где использовано самое большое количество стабилизатора, но в этом случае высокая стабильность обусловлена, в основном, частичным гелеобразованием желатина при стоянии золя. Таким образом, можно считать, что использованный диапазон концентраций 5%-го водного раствора желатина от 0.14 до 0.7 мл на синтез обеспечивает приемлемую стабильность золя в течение, как минимум, 4 ч выстаивания.

На рис. 5 представлены данные по стабилизации золя с помощью поверхностно-активного вещества CTAB.

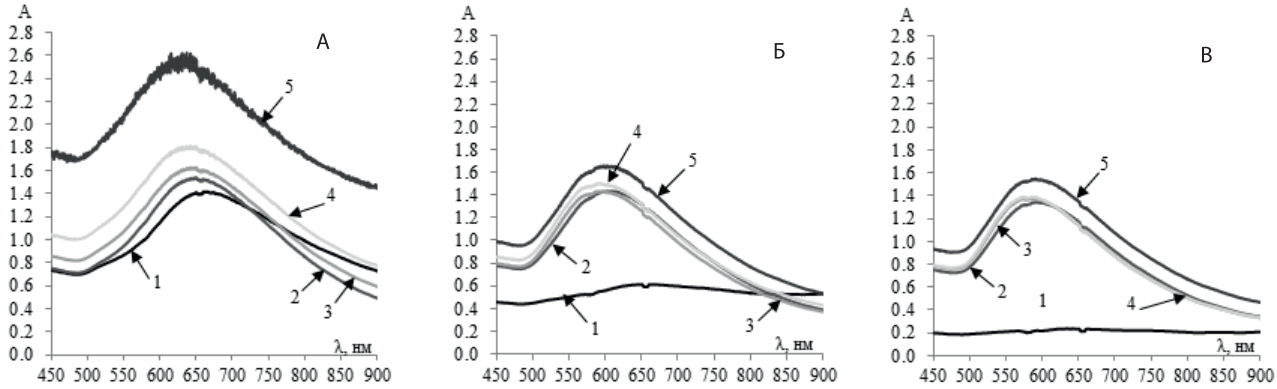

Рис. 5. Спектры поглощения золотого золя, синтезированного гидрохиноновым методом, стабилизированного различным количеством CTAB в виде 0.5%-го раствора (1 – без CTAB; 2 – 0.14 мл; 3 – 0.35 мл; 4 – 0.7 мл; 5 – 1.4 мл), снятые сразу после синтеза (А); через 1 ч после синтеза (Б) и через 4 ч после синтеза (В). Толщина кюветы во всех опытах 1 см.

Уже в первой серии опытов (рис. 5), сразу после введения стабилизатора CTAB наблюдается нарастание оптических плотностей золя относительно контрольного опыта при одновременном сдвиге максимума поглощения в коротковолновую область спектра.

Как следует из данных рис. 6, использование полимера PDDA обеспечивает стабильность золя в течение 4 ч выстаивания даже при минимальной концентрации (0.14 мл 0.1% водного раствора) в расчете на один синтез.

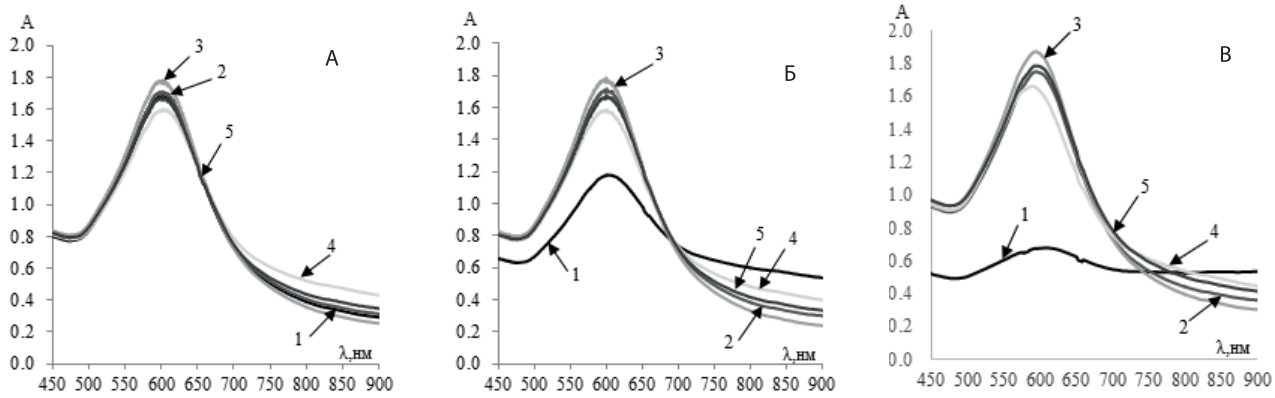

Рис. 6. Спектры поглощения золотого золя, синтезированного гидрохиноновым методом, стабилизированного различным количеством PDDA в виде 0.1% раствора (1 – без PDDA; 2 – 0.14 мл; 3 – 0.35 мл; 4 – 0.7 мл; 5 – 1.4 мл), снятые сразу после синтеза (А); через 1 ч после синтеза (Б) и через 4 ч после синтеза (В). Толщина кюветы во всех опытах 1 см.

Согласно литературным данным [14], при одностадийном методе синтеза наночастиц золота, полученных восстановлением $H[AuCl_4]$, как правило, образуются шарообразные частицы золота (Au^0_n), плазмонная полоса поглощения которых расположена в области 520–540 нм. Рост количества наночастиц золота с более длинноволновой полосой (вплоть до 900–1000 нм) наблюдается в многостадийных схемах синтеза и связан с образованием анизотропных частиц золота, как правило, стержнеобразной формы [11–13]. В настоящей работе при синтезе наночастиц золота под действием органических восстановителей на $H[AuCl_4]$ в водном растворе первоначально образуются сферические наночастицы размером 20–30 нм с максимумом плазмонного резонанса при 520–530 нм. Затем при выстаивании коллоидного раствора золота происходит агрегация частиц, в результате которой образуются укрупненные агрегаты различной формы. Наиболее крупные из них имеют форму слипшихся шариков и подобны цветкам с размерами около 200 нм, как показано на рис. 7.

Следствием слипания наночастиц золота может быть не только потеря коллоидной стабильности системы золя, но и длинноволновый сдвиг плазмонной полосы укрупненной анизотропной частицы золота.

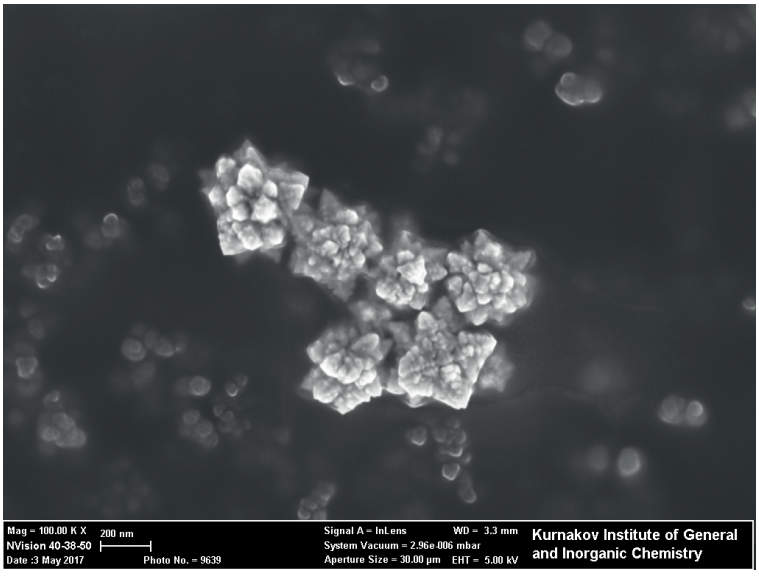

Рис. 7. Электронная микрофотография наночастиц золота, полученных гидрохиноновым методом, после выстаивания золя.

Схематически процесс выглядит, очевидно, следующим образом (рис. 8):

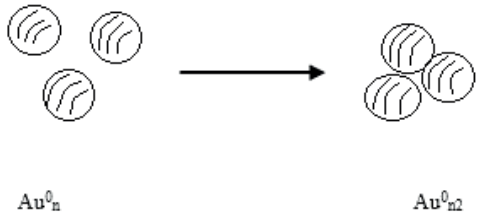

Рис. 8. Схема слипания наночастиц золота.

Не исключено, что причиной коагуляционных процессов служит недостаточный электрический заряд отдельных частиц Au^0_n. Следствием слипания является коллоидная нестабильность системы, как это видно, например, из опытов синтеза золя золота с использованием гидрохинона.

Согласно полученным в работе результатам, введение в систему золя поверхностно-активных соединений позволяет стабилизировать коллоидную систему из анизотропных слипшихся частиц Au^0_{n2} и, таким образом, реализовать возможность одностадийного синтеза плазмонных частиц с батохромно смещенным максимумом плазмонной полосы. Из рис. 9 видно, что стабилизированный золь содержит частицы меньшего размера, между которыми практически нет слипания.

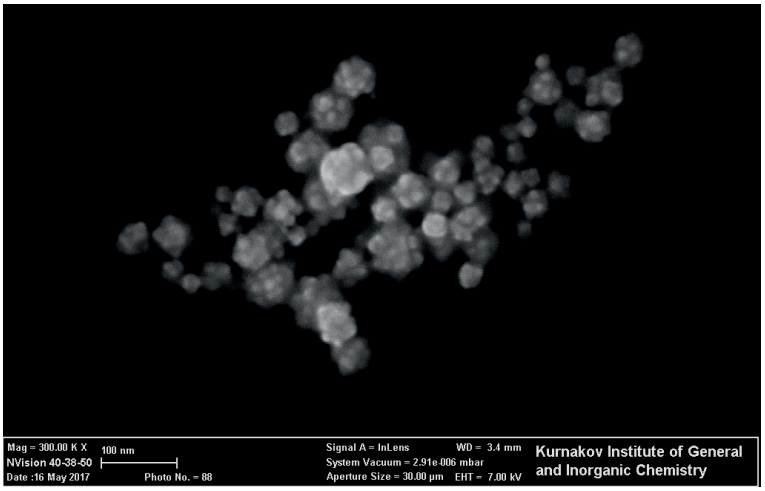

Рис. 9. Электронная микрофотография наночастиц золота, стабилизированных желатином.

Процесс стабилизации системы плазмонных наночастиц Au^0_n может быть представлен в виде схемы (рис. 10):

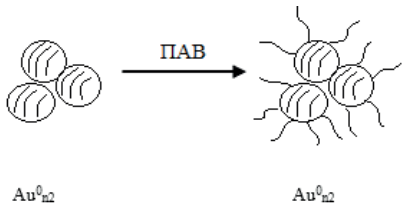

Рис. 10. Схема стабилизации системы плазмонных наночастиц.

Выводы

- Проведены реакции восстановления золотохлористоводородной кислоты различными органическими соединениями, такими как формалин, цитрат натрия и гидрохинон.
- Получены наночастицы золота с варьируемым диапазоном максимумов поглощения от 520 до 720 нм, который зависит от различных факторов – температуры, концентрации и типа восстановителя.
- Исследовано влияние некоторых стабилизаторов на устойчивость золя золота, синтезированного гидрохиноновым методом.
- Показано, что все исследованные типы стабилизаторов обеспечивают стабильность золей золота в течение нескольких часов.

Авторы выражают благодарность Н.А. Лобановой (Московский технологический университет, институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова) за измерение дзета-потенциалов, А.Е. Баранчикову (Институт общей и неорганической химии РАН) за помощь в получении микрофотографий наночастиц.

Список литературы:

1. Shah M., Badwaik V., Kherde Y., Waghwani H.K., Modi T., Aguilar Z.P., Rodgers H., Hamilton W., Marutharaj T., Webb C., Lawrenz M.B., Dakshinamurthy R. Gold nanoparticles: Various methods of synthesis and antibacterial applications // Frontiers in Bioscience. 2014. № 19. P. 1320–1344.

2. Aherne D., Ledwith D.M., Gara M., Kelly J.M. Optical properties and growth aspects of silver nanoprisms produced by a highly reproducible and rapid synthesis at room temperature // Adv. Funct. Mater. 2008. № 18. P. 2005–2016.

3. Millstone J.E., Hurst S.J., Metraux G.S., Cutler J.I., Mirkin C.A. Colloidal gold and silver triangular nanoprisms // Small. 2009. № 5. P. 646–664.

4. Sun Y.G. Metal nanoplates on semiconductor substrates // Adv. Funct. Mater. 2010. № 20. P. 3646–3657.

5. Bastys V., Pastoriza-Santos I., Rodríguez-González B., Vaisnoras R., Liz-Marzán L.M. Formation of silver nanoprisms with surface plasmons at communication wavelengths // Adv. Funct. Mater. 2006. № 16. P. 766–773.

6. http://www.samsung.com/global/tv/ (Дата обращения: 15.03.2017)

7. Ершов Б.Г. Наночастицы металлов в водных растворах: электронные, оптические и каталитические свойства // Рос. хим. журн. 2001. Т. XLV. № 3. С. 20–30.

8. Gao C., Goebl J., Yin Y. Seeded growth route to noble metal nanostructures // J. Mater. Chem. C. 2013. V. 1. P. 3898–3909.

9. Silva J. N., Saade J., Farias P. M. A., Falcão E. H. L. Colloidal synthesis of silver nanoprisms in aqueous medium: Influence of chemical compounds in UV/Vis absorption spectra // Advances in Nanoparticles. 2013. № 2. P. 217-222.

10. Zhang C., Sun L-D., Yan C-H. Noble metal plasmonic nanostructure related chromisms // Inorg. Chem. Front. 2016. № 3. P. 203–217.

11. Ye X.C., Jin L.H., Caglayan H., Chen J., Xing G.Z., Zheng C., Doan-Nguyen V., Kang Y.J., Engheta N., Kagan C.R., Murray C.B. Design of an ultra-sensitive gold nanorod colorimetric sensor and its application based on formaldehyde reducing Ag^+ // ACS Nano. 2012. № 6. P. 2804–2817.

12. Ye X.C., Gao Y.Z., Chen J., Reifsnyder D.C., Zheng C., Murray C.B. Seeded growth of monodisperse gold nanorods using bromide-free surfactant mixtures // Nano Lett. 2013. № 13. P. 2163–2171.

13. Ye X.C., Zheng C., Chen J., Gao Y.Z., Murray C.B. Using binary surfactant mixtures to simultaneously improve the dimensional tunability and monodispersity in the seeded growth of gold nanorods // Nano Lett. 2013. № 13. P. 765–771.

References:

1. Shah M., Badwaik V., Kherde Y., Waghwani H.K., Modi T., Aguilar Z.P., Rodgers H., Hamilton W., Marutharaj T., Webb C., Lawrenz M.B., Dakshinamurthy R. Gold nanoparticles: Various methods of synthesis and antibacterial applications // Frontiers in Bioscience. 2014. № 19. P. 1320–1344.

2. Aherne D., Ledwith D.M., Gara M., Kelly J.M. Optical properties and growth aspects of silver nanoprisms produced by a highly reproducible and rapid synthesis at room temperature // Adv. Funct. Mater. 2008. № 18. P. 2005–2016.

3. Millstone J.E., Hurst S.J., Metraux G.S., Cutler J.I., Mirkin C.A. Colloidal gold and silver triangular nanoprisms // Small. 2009. № 5. P. 646–664.

4. Sun Y.G. Metal nanoplates on semiconductor substrates // Adv. Funct. Mater. 2010. № 20. P. 3646–3657.

5. Bastys V., Pastoriza-Santos I., Rodríguez-González B., Vaisnoras R., Liz-Marzán L.M. Formation of silver nanoprisms with surface plasmons at communication wavelengths // Adv. Funct. Mater. 2006. № 16. P. 766–773.

6. http://www.samsung.com/global/tv/ (Date of access: 15.03.2017)

7. Ershov B.G. Metal nanoparticles in aqueous solutions: electronic, optical and catalytic properties // Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal (Russian Chemical Journal) 2001. V. XLV. № 3. P. 20–30. (in Russ.)

8. Gao C., Goebl J., Yin Y. Seeded growth route to noble metal nanostructures // J. Mater. Chem. C. 2013. V. 1. P. 3898–3909.

9. Silva J. N., Saade J., Farias P. M. A., Falcão E. H. L. Colloidal synthesis of silver nanoprisms in aqueous medium: Influence of chemical compounds in UV/Vis absorption spectra // Advances in Nanoparticles. 2013. № 2. P. 217-222.

10. Zhang C., Sun L-D., Yan C-H. Noble metal plasmonic nanostructure related chromisms // Inorg. Chem. Front., 2016. № 3. P. 203–217.

11. Ye X.C., Jin L.H., Caglayan H., Chen J., Xing G.Z., Zheng C., Doan-Nguyen V., Kang Y.J., Engheta N., Kagan C.R., Murray C.B. Design of an ultra-sensitive gold nanorod colorimetric sensor and its application based on formaldehyde reducing Ag^+ // ACS Nano. 2012. № 6. P. 2804–2817.

12. Ye X.C., Gao Y.Z., Chen J., Reifsnyder D.C., Zheng C., Murray C.B. Seeded growth of monodisperse gold nanorods using bromide-free surfactant mixtures // Nano Lett. 2013. № 13. P. 2163–2171.

13. Ye X.C., Zheng C., Chen J., Gao Y.Z., Murray C.B. Using binary surfactant mixtures to simultaneously improve the dimensional tunability and monodispersity in the seeded growth of gold nanorods // Nano Lett. 2013. № 13. P. 765–771.

14. Бычковский П.М., Кладиев А.А., Соломевич С.О., Щеголев С.Ю. Золотые наночастицы: синтез, свойства, биомедицинское применение // Рос. биотерапевт. журн. 2011. № 3. Т. 10. С. 37–46.

14. Bychkovskiy P.M., Kladiev A.A., Solomevich S.O., Schegolev S.Yu. Gold nanoparticles: Synthesis, properties, biomedical application // Rossiyskiy bioterapevticheskiy zhurnal (Russian Biotherapeutic Journal). 2011. № 3. V. 10. P. 37–46. (in Russ.)

Об авторах:

Фасхутдинова Илена Ильшатовна, студент кафедры физической химии им. Я.К. Сыркина Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Михайлов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры физической химии им. Я.К. Сыркина Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Шапиро Борис Исаакович, доктор химических наук, профессор кафедры физической химии им. Я.К. Сыркина Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

About authors:

Ilena I. Faskhutdinova, Student, Ya.K. Syrkin Chair of Physical Chemistry, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

Alexander S. Mikhailov, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, Ya.K. Syrkin Chair of Physical Chemistry, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

Boris I. Shapiro, Dr.Sc. (Chemistry), Professor, Ya.K. Syrkin Chair of Physical Chemistry, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).