

УСИЛЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МОЛЕКУЛ КРАСИТЕЛЕЙ В ПРИСУТСТВИИ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОЧАСТИЦ

© 2011 Т. И. Суворова¹, А. Н. Балбекова¹, А. Н. Латышев¹, В. Г. Клюев¹,
О. В. Овчинников¹, М. С. Смирнов¹, А. М. Рыбалко¹, С. А. Солдатенко²

¹ Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1, 394006 Воронеж, Россия

² Воронежский государственный технический университет, Московский пр-т 14, 394026 Воронеж, Россия

Поступила в редакцию 11.03.2011 г.

Аннотация. Получены результаты, подтверждающие увеличение возбуждения молекул органических красителей за счет нелинейной концентрации светового поля в волновой зоне по отношению к металлическим наночастицам, приводящее к усилению интенсивности люминесценции. Показана возможность создания протяженных сред, усиливающих люминесценцию молекул в несколько раз. Получены конкретные данные для молекул акридинового желтого и метиленового голубого в присутствии наночастиц серебра диаметром от 10 до 100 нм.

Ключевые слова: усиление люминесценции, серебряные наночастицы, спектры поглощения, спектры люминесценции.

ВВЕДЕНИЕ

Давно известно, что органические молекулы вблизи металлической поверхности и, в частности, около микро- и наночастиц серебра и золота значительно меняют свои характеристики [1—5]. При этом интенсивность их люминесценции в одних случаях ослабевает, а в других, наоборот, увеличивается. Наиболее ярко проявляется этот эффект в гигантском комбинационном рассеянии молекул, адсорбированных на шероховатой поверхности благородных металлов (ГКР) [6—8]. Эти изменения свойств молекул связывались с резонансом электронного перехода s , так называемыми, локализованными плазмонами в металлических частицах, то есть с коллективными колебаниями свободных электронов, возбуждаемыми электромагнитной волной. Ранее было известно, что зависимость коэффициента ослабления света от частоты при дифракции на малых частицах с действительным показателем преломления имеет резонансный характер [9]. Это явление называлось оптическим резонансом. Для сферических частиц с комплексным показателем преломления с малой действительной частью в рамках теории Ми [9, 10] также был обнаружен резонанс [11—13]. Он возникает на множестве различных частот, соответствующих всем мультиполям. Однако, как правило, локализованный плазмон рассматривается лишь в диполь-

ном приближении. Энергия плазменных колебаний в резонансе значительно выше по сравнению с его отсутствием. Поэтому в резонируемой частице и в ближнеполевой части пространства создается поле высокой напряженности. Это означает, что молекулы, попадающие в это поле, будут сильно либо возмущены (при рассеянии света), либо возбуждены (в случае люминесценции). Следствием этого будет усиление интенсивности рассеянного или излученного света.

Первый (дипольный) член разложения коэффициента ослабления состоит из двух слагаемых, соответствующих рассеянию и поглощению света частицей [10]. Поглощение представляет собой потерю энергии электромагнитной волны и превращение ее в тепловую энергию. Рассеиваемая волна, складываясь с падающей, увеличивает локальное поле в местах расположения окружающих частицу молекул, что может приводить к дополнительному усилению интенсивности рассеянного света и люминесценции [4, 7].

Сказанное объясняет явление изменения свойств молекул вблизи металлических частиц с точки зрения волновых процессов. Но существует и другое объяснение этому. Оно опирается на работу [15], в которой Парселл впервые показал, что вероятность спонтанного перехода атома в резонаторе с большой добротностью, настроенного на его

частоту излучения, должна существенно возрастать. Увеличение вероятности квантовых переходов атома или молекулы, находящихся внутри резонатора или вблизи него приводит к увеличению числа электронных переходов в молекуле и, следовательно, к росту поглощения и испускания ею электромагнитного излучения. Позже [16—18] выяснилось, что вероятность спонтанного перехода может уменьшаться при расстройке резонанса и даже полностью подавляться, если частота квантового перехода меньше основной (низшей) моды резонатора.

Если металлическая частица имеет очень малые размеры (меньше одного нанометра) и состоит из сравнительно малого количества атомов, описанные представления о взаимодействии ее с электромагнитной волной нельзя считать вполне приемлемыми. В этом случае существенную роль начинают играть квантовые эффекты.

В работах [19—23] было показано, что время жизни в возбужденном состоянии атомов и молекул существенно зависит от радиуса наночастиц и расстояния до их поверхности. По мере сближения излучающих атомов и молекул с наночастицей вероятность перехода из возбужденного состояния, начиная с расстояний порядка размера этой частицы, увеличивается. Однако это увеличение происходит не только за счет увеличения скорости радиационных переходов, но и благодаря тому, что при взаимодействии атомов и молекул с металлической наночастицей энергия их возбуждения частично расходуется на нерадиационные (тепловые) потери. Нерадиационные потери приводят к уменьшению квантового выхода оптического перехода. Они сначала невелики, а затем начинают расти быстрее радиационных потерь и, начиная с некоторого расстояния, становятся больше их. В непосредственной близости от наночастицы остаются в основном только нерадиационные потери. Интенсивность люминесценции молекул на расстояниях меньше 2 нм резко падает до нуля [20]. Это сильнее всего сказывается для наночастиц очень малого размера. Скорость радиационного распада пропорциональна четвертой степени их радиуса [19]. Следует отметить, что эффект влияния нанотел зависит от их формы.

Несмотря на то, что рассматриваемый вопрос достиг достаточно глубокого понимания на уровне отдельных молекул и атомов, остаются нерешенные проблемы для неоднородных сред, содержащих как молекулы, так и наночастицы. Интерес к ним обусловлен тем, что такие среды могут быть

применены как источники люминесцентного излучения или ГКР [24—27], как среды, в которых может эффективно проходить фотохимический катализ при повышенной фотостабильности адсорбированных молекул [28, 29], а также как активные среды для усиления излучения [30]. В данной работе проведены исследования усиления люминесценции молекул некоторых органических красителей в таких неоднородных средах.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения одинаковых по размеру наночастиц (НЧ) серебра, распределенных равномерно в желатине синтезировалась мелкозернистая фотографическая эмульсия микрокристаллов хлористого серебра с небольшой примесью иода. После поливки эмульсии на стеклянную подложку она сушилась и подвергалась облучению при комнатных температурах излучением лампы накаливания мощностью 500 Вт на расстоянии 60 см при разных экспозициях. Для получения серебряных частиц разного размера засвечивание проводилось в течение разного времени — 30 с, 1,5 мин и 20 часов. Оставшийся галогенид серебра удалялся с помощью раствора гипосульфита. После этого слой желатины с диспергированными НЧ тщательно промывался в дистиллированной воде и снимался с подложки. Одна часть полученной массы использовалась для контроля размера и формы НЧ с помощью электронного микроскопа ЭМВ-100БР. Другая часть разбавлялась всегда одним и тем же количеством раствора чистой желатины или желатины с растворенными в ней молекулами красителей. Весовая доля желатины по отношению к воде была равна 5%. Далее 5 мл раствора поливались на стеклянную пластину $9 \times 6 \text{ см}^2$, после чего образцы высушивались в стандартных условиях. Толщина слоев получалась всегда равной $37 \pm 2 \text{ мкм}$. Размер НЧ, их форма и расстояния между ними вновь контролировались с помощью электронного микроскопа. Выяснилось, что в результате описанных процедур серебряные частицы имели близкую к сферической форму, оставались изолированными, а их размер не изменялся. Были получены НЧ серебра размером $10 \pm 3 \text{ нм}$ (Н1), $45 \pm 5 \text{ нм}$ (Н2) и $70\text{—}100 \text{ нм}$ (Н3). В первых двух случаях образцы получились достаточно однородными. При больших временах засветки (в образцах Н3) кроме крупных частиц с диаметром $70\text{—}100 \text{ нм}$ наблюдался весь набор мелких, начиная от частиц диаметром 10 нм, крупных частиц оказалось 10%. Среднее расстояние между наночастицами во всех

случаях составило 270—290 нм. Это соответствует концентрации серебряных частиц одного и того же порядка величины — 10^{14} см⁻³.

Поскольку ослабление света серебряными частицами при таких концентрациях было очень большим, изучались также образцы, изготовленные из эмульсий, разбавленных в десять раз. Концентрации НЧ уменьшались соответственно тоже в десять раз. В этом случае обозначим образцы так — Н1/10, Н2/10 и Н3/10.

В работе использовались молекулы органических красителей — акридинового желтого (АЖ) и метиленового голубого (МГ). Молекулы АЖ поглощают в той же области, что и НЧ-1 серебра, а молекулы МГ имеют максимум поглощения, не совпадающий с максимумами поглощения наночастиц серебра, но полоса поглощения этой молекулы значительно перекрывается с полосой для Н3.

Концентрации молекул красителей после сливания с дисперсией НЧ и высушивании образцов были разные и составляли $1,2 \times 10^{17}$, $1,2 \times 10^{18}$ и $1,2 \times 10^{19}$ см⁻³. Обозначим образцы с этими концентрациями соответственно АЖ1, АЖ2, АЖ3 и МГ1, МГ2, МГ3. Среднее расстояние между молекулами в разных образцах было 20, 10 и 4,4 нм. Отсюда следует, что в пределах расстояний, на которых эффект усиления люминесценции превышает шумовой порог (поданным [20] это 25—30 нм для золотых наночастиц) для образцов, содержащих Н1, попадает только около 2%, а для Н3 более 20% всех молекул. Поэтому для наших образцов усиление люминесценции не может достичь предельной величины, наблюдаемой в работах [20, 22, 23] для одиночных молекул.

Спектры поглощения слоев измерялись на приборе Shimadzu UV-mini-1240. Возбуждение люминесценции осуществлялось излучением лазера (длина волны 635 нм) в случае МГ и светом ртутной лампы (длина волны 436 нм) в случае АЖ. Источник возбуждения выбирался так, чтобы длина волны возбуждения попадала в максимум поглощения красителя. Измерение интенсивности люминесценции проводилось методом счета фотонов.

В работе проводился учет эффектов реабсорбции и экранировки, так как они существенно скрывают усиление [31]. Для образцов, полученных из разбавленных в десять раз эмульсий, поправки на реабсорбцию и экранировку составляли менее 10% от наблюдаемого эффекта усиления.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования эффекта усиления люминесценции молекул органических красителей в присутствии наночастиц серебра сводились к измерениям спектров поглощения и люминесценции желатиновых слоев, содержащих разные концентрации молекул акридинового желтого (АЖ1, АЖ2, АЖ3) и метиленового голубого (МГ1, МГ2, МГ3), желатиновых слоев, содержащих наночастицы серебра разного размера в концентрации 10^{14} см⁻³ (Н1, Н2, Н3) и те же частицы, но с концентрацией в десять раз меньше (Н1/10, Н2/10, Н3/10), а также слои смешанного состава: для акридинового желтого — АЖ_{*i*} + Н2 и АЖ_{*i*} + Н2/10, где *i* = 1, 2, 3; для метиленового голубого — МГ_{*i*} + Н_{*k*} и МГ_{*i*} + Н_{*k*}/10, где *i*, *k* = 1, 2, 3. На рис. 1 представлены спектры поглощения образцов, содержащих только наночастицы серебра (Н1, Н2, Н3), спектры поглощения образцов, содержащих только молекулы красителей в максимальных концентрациях (АЖ3 и МГ3). На этом же рисунке показаны спектры люминесценции образцов АЖ2 и МГ3 и наиболее показательные спектры образцов смешанных составов — АЖ2 + Н3/10 и МГ3 + Н3/10. В верхней части рисунка приведены электронные фотографии образцов Н1, Н2 и Н3.

Видно, что положение максимумов спектров поглощения различно для частиц разного размера. Так для мелких Н1 максимум лежит в области 382 нм, для средних Н2 — в области 403 нм, для крупных Н3 — в области 440 нм. Кроме того, для Н3 наблюдается уширение полосы в длинноволновой области соответственно тому, что они содержат значительное количество НЧ размером в 100 нм.

Из рисунка следует также, что для молекул акридинового желтого максимум спектра поглощения совпадает с максимумом ослабления для частиц серебра Н2. В то же время для молекул метиленового голубого такое совпадение отсутствует. Можно лишь отметить, что полосы поглощения МГ3 и Н3 значительно перекрываются, а максимум спектра МГ3, как будет показано ниже, близок к максимумам для наиболее крупных частиц серебра (~ 100 нм), присутствующих в этих образцах. Видно, что спектры люминесценции, возбужденные в полосах поглощения каждого красителя, имеют обычный стоксов сдвиг. Для образцов АЖ2 + Н2/10 и МГ3 + Н3/10 кривые на этом рисунке не исправлены на эффекты экранировки и реабсорбции. Однако они проходят выше кривых для образцов

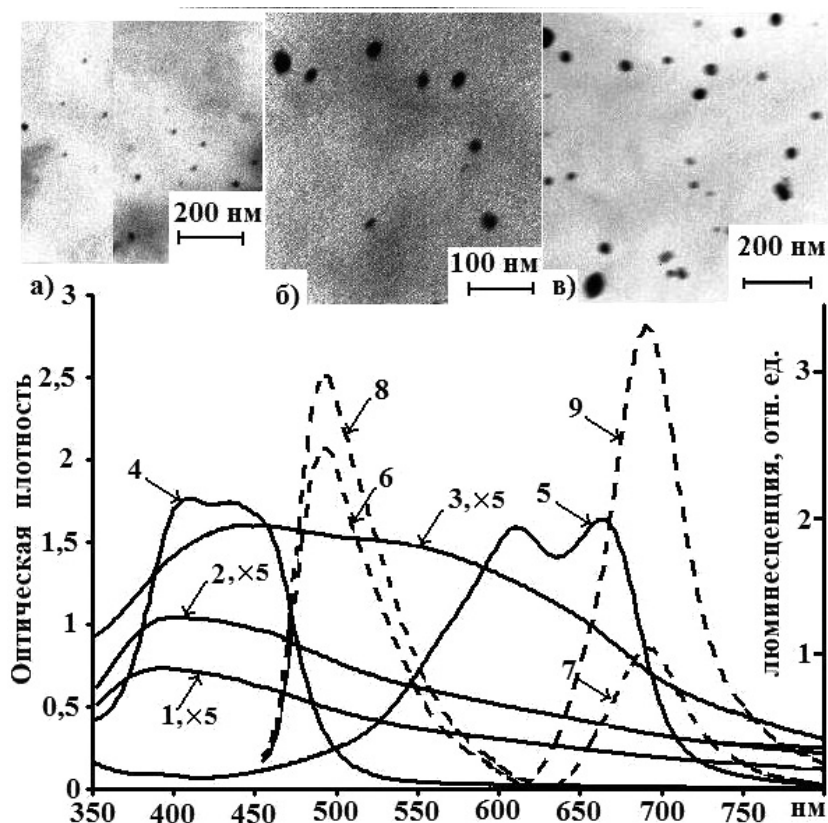


Рис. 1. Спектры поглощения желатиновых слоев, содержащих наночастицы Н1 (1), Н2 (2), Н3 (3) и молекулы красителей АЖ3 (4), МГ3 (5). Спектры люминесценции молекул красителей АЖ3 (6), МГ3 (7). Спектры люминесценции образцов состава АЖ2+Н3/10 (8), МГ3+Н3/10 (9). Для наглядности масштаб ординат кривых 1—3 увеличен в 5 раз. Вверху электронные фотографии: а — наночастицы Н1, б — наночастицы Н2, в — наночастицы Н3

АЖ2 и МГ2, соответственно. Это указывает на наличие усиления люминесценции молекул в присутствии НЦ серебра. Следует обратить внимание на то, что это усиление для молекул метиленового голубого значительно больше по сравнению с этим эффектом для молекул акридинового желтого.

Эффект усиления определялся по коэффициенту К, представляющим собой отношение интенсивности полос в максимуме спектров люминесценции для образцов в присутствии и отсутствии НЦ. На рис. 2 показаны значения этого коэффициента для исследуемых образцов. Для наглядности экспериментальные точки, относящиеся к одной концентрации молекул, соединены кривыми линиями — сплошными без исправления экспериментальных данных, пунктирными после исправления на эффекты экранировки и реабсорбции. Видно, что для АЖ1 и АЖ3 коэффициент К при максимальной и разбавленной концентрациях НЦ меньше единицы. Он превышает единицу и достигает значения 1,2 лишь в одном случае — для АЖ2 + Н2/10. Это положение практически не ме-

няется и после исправления экспериментальных данных на эффекты экранировки и реабсорбции (пунктирные кривые). Это означает, что, несмотря на совпадение полос поглощения молекул и НЦ (резонанс) усиление невелико. Для молекул метиленового голубого, наоборот, коэффициент усиления даже для неразбавленных концентраций НЦ, приводящих к сильному эффекту экранировки, в большинстве случаев превышает единицу. После введение поправок он всегда выше единицы, достигая значения 2,5—4. Надо обратить внимание на то, что поправки экспериментальных значений для разбавленных концентраций НЦ не превышают 5—10%. В случае неразбавленных концентраций они существенно выше (~60%). Однако, при этом исправленные значения коэффициента усиления для неразбавленных концентраций выше его значений для образцов с разбавленной концентрацией, что соответствует физическому смыслу. Численные значения полученных после исправления коэффициента усиления во всех исследованных случаях сведены в табл. 1 и 2. Таким образом, для образцов

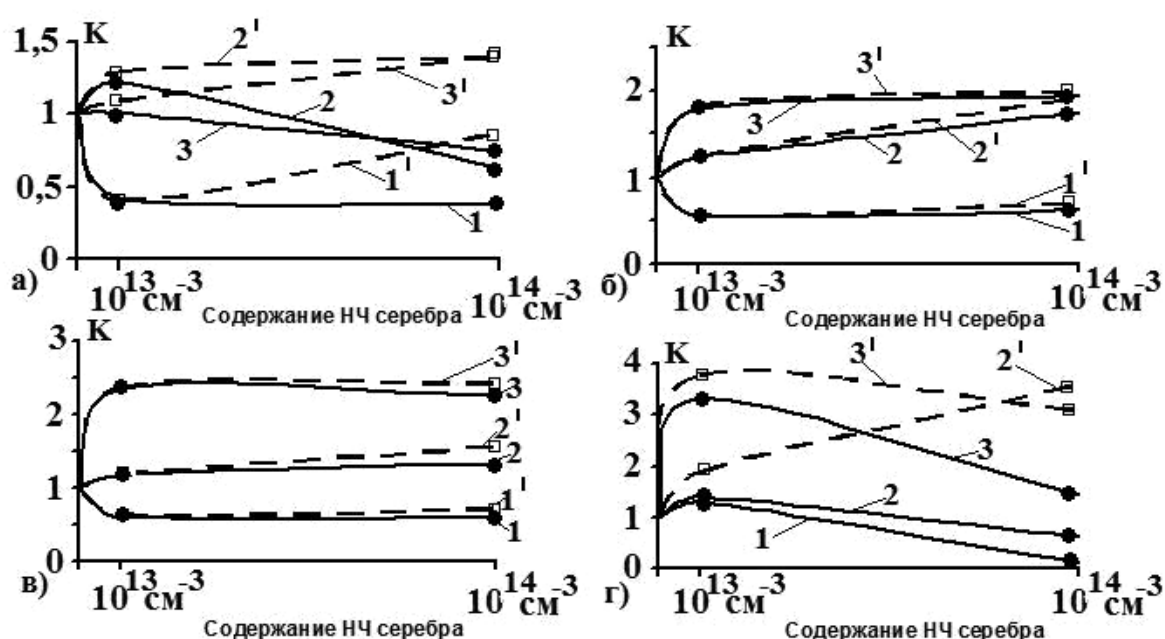


Рис. 2. Зависимость коэффициента K от концентрации серебряных наночастиц: *а* — для образцов с красителем АЖ и наночастицами Н2; *б* — для образцов с красителем МГ и наночастицами Н1; *в* — для образцов с красителем МГ и наночастицами Н2; *г* — для образцов с красителем МГ и наночастицами Н3. Кривые 1 соответствуют образцам с наименьшей концентрацией красителя АЖ1 и МГ1, кривые 2 соответствуют образцам со средней концентрацией красителей АЖ2 и МГ2, кривые 3 соответствуют образцам с наибольшей концентрацией красителя АЖ3 и МГ3. Кривые 1', 2', 3' получены из кривых 1, 2, 3 при учете эффектов экранировки и реабсорбции.

Таблица 1. Коэффициенты усиления для случая молекул акридинового желтого в присутствии наночастиц серебра в неразбавленной и разбавленной концентрации

	Н2	Н2/10
АЖ3 ($1,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$)	1,4	1,1
АЖ2 ($1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	1,4	1,3
АЖ1 ($1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$)	0,9	0,4

с молекулами метиленового голубого обнаружено существенное усиление интенсивности люминесценции.

Исключительно важно отметить, что коэффициент усиления в случае метиленового голубого для концентраций НЦ, отличающихся в десять раз, отличается мало. Так, для образцов МГ3 коэффициент усиления для Н1 он равен 2, а для Н1/10 — 1,8; для Н2 и Н2/10 он одинаков и равен 2,4. Аналогичные соотношения имеются и в других случаях (см. рис. 2*в* и 2*г*, а также табл. 2). Это обстоятельство отражает тот факт, что увеличение количества молекул, непосредственно взаимодействующих

Таблица 2. Коэффициенты усиления для случая молекул метиленового голубого в присутствии наночастиц серебра в неразбавленной и разбавленной концентрации.

	Н1	Н1/10	Н2	Н2/10	Н3	Н3/10
МГ3 ($1,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$)	2,0	1,8	2,4	2,4	3,2	3,8
МГ2 ($1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	1,9	1,2	1,6	1,2	3,7	1,9
МГ1 ($1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$)	0,7	0,6	0,7	0,6	—	1,8

щих с НЦ в слое толщиной около 25—30 нм в десять раз, практически не влияет на величину коэффициента усиления. Это указывает на механизм, наблюдаемого эффекта усиления в данной работе.

Для выявления причины различного влияния наночастиц серебра для изучаемых молекул были проведены расчеты коэффициентов ослабления, рассеяния и поглощения сферических НЦ серебра, находящихся в желатине, по теории Ми [10]. Учитывалась дисперсионная зависимость от длины волны комплексного показателя преломления серебра [32]. Показатель преломления желатины был взят равным 1,5. Расчет проведен для диаметров наночастиц 10 нм, 45 нм, 100 нм и для смеси частиц (30% — 10 нм, 30% — 45 нм, 30% — 70 нм и 10% — 100 нм), модулирующей образцы НЗ. Результаты представлены на рис. 3 а, б, в, г. На том же рисунке (рис. 3д) приведены и экспериментальные спектры ослабления наночастиц Н1, Н2 и Н3. Прежде всего, нужно обратить внимание на то, что значения коэффициентов ослабления для малых частиц (10 нм) на два порядка меньше значений для более крупных частиц. Далее, эти малые частицы в основном поглощают. Рассеивают они всего око-

ло 3% падающего света. В то же время более крупные частицы в основном рассеивают. Так, частицы диаметром 45 нм рассеивают около 70%. Частицы в 100 нм рассеивают свет приближается к 100%. Эти частицы имеют два максимума, один из которых при 550 нм в основном обязан только рассеянию. При этом второй также определяется рассеянием. Частицы смешанного состава также в основном рассеивают свет, слабо поглощая его. Качественно экспериментальные и теоретические кривые достаточно хорошо соответствуют друг другу. Количественное совпадение их ожидать нельзя в виду того, что для малых НЦ должно происходить размерное изменение комплексного показателя преломления, которое в расчетах не учитывалось.

Результаты расчета позволяют понять полученные экспериментальные результаты. Действительно, то обстоятельство, что малые частицы в основном поглощают, а не рассеивают (не излучают), объясняет слабое усиление молекул акридинового желтого, несмотря на наличие резонанса. Эти частицы имеют малое эффективное сечение ослабления. Это так же сказывается на коэффициенте

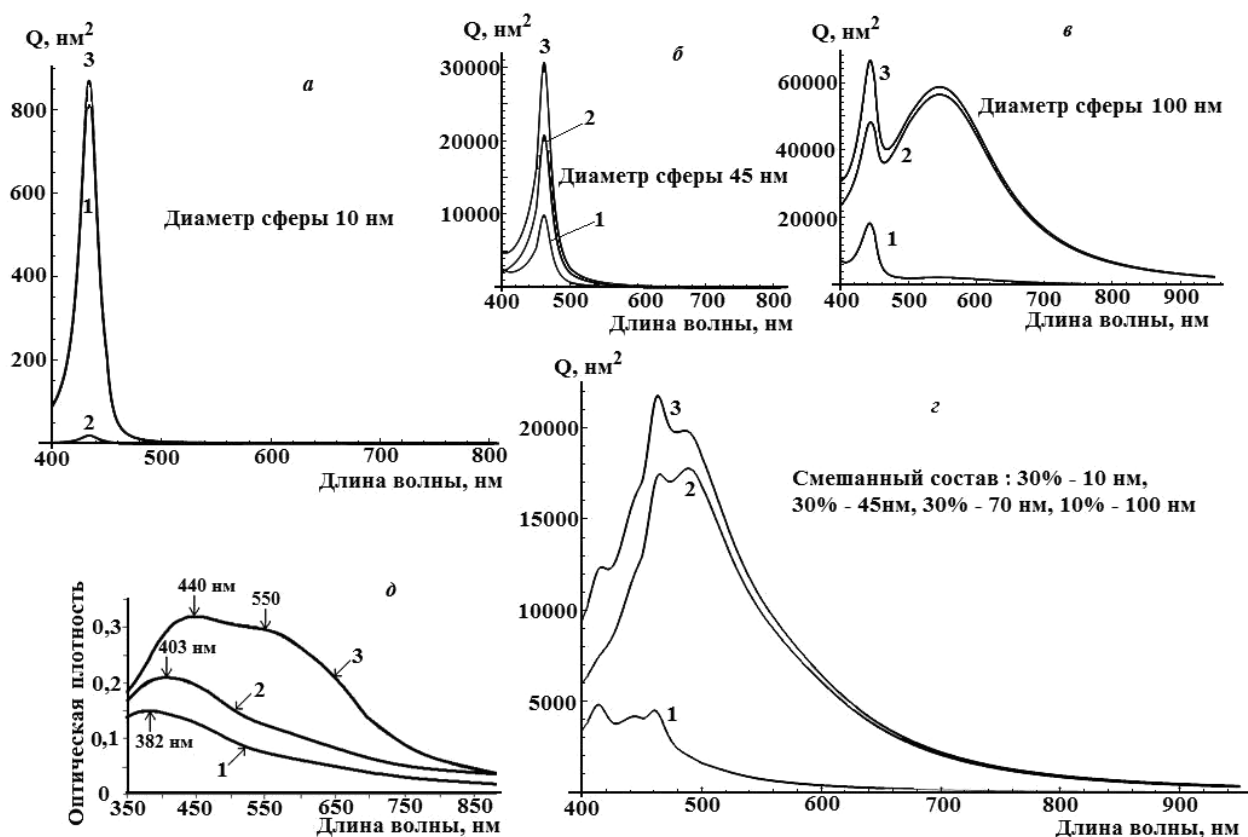


Рис. 3. а, б, в, г — спектры поглощения (1), рассеяния (2) и ослабления (3) наночастиц серебра, полученные расчётом по теории Ми; д — экспериментальные спектры поглощения наночастиц серебра Н1 (1), Н2 (2), Н3 (3)

усиления. Кроме того, как было указано ранее, число молекул, входящих в ближайшее окружение НЦ, для малых частиц составляет всего несколько процентов. Поэтому можно считать доказанным, что использование серебряных НЦ размером до 40 нм для усиления даже в случае наличия резонанса не имеет перспективу. В то же время при использовании более крупных НЦ даже в отсутствии совпадения максимумов поглощения молекул с максимумами ослабления наночастиц, наоборот, усиление достаточно сильное. Обнаружено существование оптимальных условий, заключающиеся в использовании для каждого размера НЦ серебра с диаметрами, превышающими 40—50 нм, определенных концентраций, при которых коэффициент усиления достигает значений, равных 2—3, без учета эффектов экранировки и реабсорбции.

Как было указано выше, коэффициент усиления для метиленового голубого мало зависит от концентрации НЦ серебра в образцах. Это трудно совместить с тем обстоятельством, что по данным работы [20] усиление происходит лишь в сферическом слое 25—30 нм, примыкающем непосредственно к каждой НЦ. Действительно, если бы усиление, наблюдаемое нами, определялось только молекулами, попадающими в этот слой, то увеличение концентрации наночастиц в десять раз привело бы к усилению в такое же число раз. Поскольку это не наблюдается, следует считать, что усиление, наблюдаемое нами, осуществляется не только для молекул, попадающих в ближайшее окружение НЦ. К этому следует добавить, что молекулы желатины, адсорбируясь на НЦ, создают достаточно толстый слой [33], препятствуя сближению с ними молекул метиленового голубого. Таким образом, можно считать, что нами показана возможность усиления люминесценции в дальней зоне по отношению к НЦ серебра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты не противоречат существующим представлениям о причинах усиления люминесценции молекул в присутствии металлических наночастиц как явления, заключающееся в изменении времени жизни возбужденных состояний таких молекул [15, 16, 19, 20]. В то же время показана возможность существования эффекта усиления люминесценции на расстояниях по отношению к НЦ серебра, превышающих обнаруженные другими авторами. Это усиление определяется нелинейной концентрации рассеянного светового поля в волновой зоне и сводится к повышению вероятности

возбуждения молекул в этой части образца. Следовательно, показана принципиальная возможность создания протяженных сред, усиливающих люминесценцию молекул. Получены конкретные данные для использования для этого серебряных НЦ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-02-00744.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агранович В. М., Галанин М. Д.* Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах. М.: Наука, 1978. 383 с.
2. *Glass A., Wohaun A., Horitage J. P.* // *Phys. Rev.* 1981. V. B 24. P. 4906.
3. *Ritchie G., Burstein E.* // *Phys. Rev.* 1981. V. B24. P. 4843—4846.
4. *Баранов А. В., Бобович Я. С., Петров В. И.* // *Оптика и спектр.* 1984. Т. 56. В. 1. С. 3—5.
5. *Дубков В. М., Акимов И. А.* // *Оптика и спектр.* 1984. Т. 56. В. 5. С. 779—781.
6. *Емельянов В. И., Коротеев Н. И.* // *УФН.* 1981. Т. 135. И. 2. С. 345—361.
7. *Баранов А. В., Бобович Я. С.* // *Оптика и спектр.* 1982. Т. 52. В. 2. С. 385.
8. *Хориа М., Шатц Дж., Ли Т. и др.* Гигантское комбинационное рассеяние /Под ред. Р. Ченга, Т. Фуртака. М.: Мир, 1984. 408 с.
9. *Van de Hulst G.* Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд. ин. лит. 1961. 536 с.
10. *Шифрин К. С.* Рассеяние света в мутной среде. М.: Гос. изд. техн.-теор. лит. 1951. 288 с.
11. *Латышев А. Н., Сивков А. С., Теселкина Н. В.* // *Оптика и спектр.* 1968. Т. 25. В. 4. С. 565—567.
12. *Латышева С. Н., Латышев А. Н., Орехова Л. Л.* // *Оптика и спектр.* 1971. Т. 30. В. 2. С. 524—528.
13. *Латышева С. Н., Латышев А. Н.* Атмосферная оптика. М.: Наука. 1974. — С. 202—206.
14. *Акцетров О. А.* // *Соровский образовательный журнал.* 2001. Т. 7 № 7. С. 110—116.
15. *Pursell E. M.* // *Phys. Rev.* 1946. V. 69. P. 681.
16. *Бункин Ф. В., Ораевский А. Н.* // *Изв. Вузов. Сер. Радиофизика.* 1959. Т. 2. № 2. С. 181.
17. *Kleppner D.* // *Phys. Rev. Lett.* 1981. V. 47. P. 233—236.
18. *Ораевский А. Н.* // *УФН.* 1994. Т. 164. № 4. С. 415—427.
19. *Климов В. В., Дюклуа М., Летохов В. С.* // *Квантовая электроника.* 2001. Т. 37. № 7. С. 569—586.
20. *Anger P., Bharadwaj P., Novotny L.* // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 96(11). P. 113002 (1—4).
21. *Esteban R., Laroche M., Greffet J.-J.* // *J. Appl. Phys.* 2009. V. 105. P. 033107 (1—10).
22. *Tomas M., Greffet J.-J., Carminati* // *Appl. Phys. Letts.* 2004. V. 85. № 17. P. 3863—3865.
23. *Fu Yi, Lakowicz R.* // *Laser & Photon. Rev.* 2009. V. 3. № 1—2. P. 221—232.

24. *Khurgin J. B., Sun G., Soref R. A.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 021120(1—3).
25. *Khurgin J. B., Sun G., Soref R. A.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 071103(1—3).
26. *Sun G., Khurgin J. B., Soref R. A.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 101103(1—3).
27. *Зуев В. С.* Поверхностные поляритоны и плазмоны. Спонтанное излучение атома вблизи тела малого радиуса. Препринт ФИАН. М.: 2006. 15 с.
28. *Long Kuai, Baoyou Geng, Xiaoting Chen, et al.* // Lengmur. 2010. V. 26 (24). P. 18723—18727.
29. *Aslan K., Malyn S. N., Geddes Ch. D.* // J. Fluoresc. 2007. V. 17. P. 7—13.
30. *Noginov M. A., Zhu G., Bahoura M., et al.* // Phys. Rev. B. 2006. V.74. P. 184203 (1—8).
31. *Владимиров Ю. А., Потапенко А. Я.* Физико-химические основы фотобиологических процессов. М: Высшая школа, 1989. С. 42—47.
32. *Розенберг Г. В.* Оптика тонкослойных покрытий. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит, 1958. 570 с.
33. *Шатило Б. И.* Теоретические начала фотографического процесса. М.: Эдиториал УРСС. 2000. 288 с.

Латышев Анатолий Николаевич — д.ф.-м.н., профессор, Воронежский государственный университет; тел.: (473) 220-8780, e-mail: opt@phys.vsu.ru

Клюев Виктор Григорьевич — д.ф.-м.н., профессор, Воронежский государственный университет; тел.: (473) 220-8780, e-mail: vgklyuev@rambler.ru

Смирнов Михаил Сергеевич — к.ф.-м.н., доцент, Воронежский государственный университет; тел.: (473) 220-8780, e-mail: opt@phys.vsu.ru

Овчинников Олег Владимирович — д.ф.-м.н., заведующий кафедрой оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет; тел.: (473) 220-8780, e-mail: opt@phys.vsu.ru

Суворова Татьяна Игоревна — аспирантка 3 года, Воронежский государственный университет; тел.: (473) 220-8780, e-mail: opt@phys.vsu.ru

Балбекова Анна Николаевна — студентка 6 курса, Воронежский государственный университет; тел.: (473) 220-8780, e-mail: astra-22@mail.ru

Рыбалко Андрей Михайлович — студент 6 курса, Воронежский государственный университет; тел.: (473) 220-8780, e-mail: opt@phys.vsu.ru

Солдатенко Сергей Анатольевич — к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет, НИЛ ЭМиЭ; тел.: (437) 246-7637, e-mail: rnileme@mail.ru

Latyshev Anatoly N. — grand PhD (physical and mathematical sciences), professor, Voronezh State University; tel.: (473) 220-8780, e-mail: opt@phys.vsu.ru

Klyuyev Viktor G. — grand PhD (physical and mathematical sciences), professor, Voronezh State University; tel.: (473) 220-8780, e-mail: vgklyuev@rambler.ru

Smirnov Mihail S. — PhD (physical and mathematical sciences), assistant professor, Voronezh State University; tel.: (473) 220-8780, e-mail: opt@phys.vsu.ru

Ovchinnikov Oleg V. — grand PhD (physical and mathematical sciences), head of optics and spectroscopy chair, Voronezh State University; tel.: (473) 220-8780, e-mail: opt@phys.vsu.ru

Suvorova Tatiana I. — the post-graduate, Voronezh State University; tel.: (473) 220-8780, e-mail: opt@phys.vsu.ru

Balbekova Anna N. — the student, Voronezh State University; tel.: (473) 220-8780, e-mail: astra-22@mail.ru

Rybalko Andrey M. — the student, Voronezh State University; tel.: (473) 220-8780, e-mail: opt@phys.vsu.ru

Soldatenko Sergey A. — PhD (physical and mathematical sciences), senior scientific employee, Voronezh State Technical University; tel.: (437) 246-7637, e-mail: rnileme@mail.ru