

Плазмон-усиленный перенос энергии в гибридных пористых структурах для люминесцентных сенсоров

© И.Ю. Никитин, Л.Н. Бородина, А.В. Болтенко, М.А. Баранов, П.С. Парфенов, И.А. Гладских, Т.А. Вартамян

Университет ИТМО,
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: nikitin0igor512@gmail.com

Поступила в редакцию 16.05.2024 г.
В окончательной редакции 18.09.2024 г.
Принята к публикации 27.09.2024 г.

Синтезирована и исследована гибридная наноструктура, состоящая из островковой серебряной пленки, покрытой нанопористым оксидом алюминия, полученным в результате анодного оксидирования металлической алюминиевой пленки. В присутствии серебряных наночастиц собственная люминесценция анодного оксида алюминия, обусловленная наличием люминесцентных центров в его структуре, усиливается. Нанесение красителя Родамин 6Ж на синтезированную наноструктуру приводит к тушению люминесценции люминесцентных центров оксида алюминия с одновременным усилением интенсивности люминесценции красителя, что свидетельствует об эффективном переносе возбуждения от люминесцентных центров на краситель в присутствии серебряных наночастиц, обладающих плазмонным резонансом в близкой полосе частот. Синтезированная структура может найти применение в оптических сенсорах и приемниках оптического излучения.

Ключевые слова: Плазмонный резонанс, Анодированный алюминий, Тонкие пленки, Люминесцентный сенсор.

DOI: 10.61011/OS.2024.09.59196.6675-24

Введение

Гибридные пористые структуры на основе оксидных пористых матриц и плазмонных наночастиц в данный момент активно исследуются, так как могут применяться в качестве оптических покрытий, в фотовольтаике, а также в качестве подложек для *in vitro* диагностики различных заболеваний [1–3]. Основными детектируемыми явлениями в последнем приложении служат комбинационное рассеяние и люминесценция [4–6]. Для детектирования комбинационного рассеяния требуется сложное дорогостоящее оборудование. Люминесцентный отклик в этом отношении гораздо более доступная характеристика, тем не менее часто интенсивность люминесцентного сигнала мала [7,8]. Существующие геометрии гибридных пористых структур не годятся для усиления люминесценции, так как плазмонные наноструктуры в них контактируют с аналитом напрямую, что ведет к тушению люминесценции [9]. В рамках данной работы описаны процесс получения и оптические свойства гибридной структуры на основе островковых пленок серебра под тонкой нанопористой матрицей оксида алюминия, которая не только выступает в качестве спейсерного слоя, предотвращающего контакт аналита с металлом, но и дополнительно увеличивает интенсивность люминесценции красителя на поверхности и в порах гибридной структуры за счёт резонансного переноса энергии от её люминесцентных центров [10–12].

Материалы и методы

Напыление серебра и алюминия

Гибридная пористая структура, а также нанопористые матрицы анодного оксида алюминия в данной работе получалась в несколько этапов. Перед напылением стеклянные подложки размером $26 \times 76 \text{ mm}^2$ очищались при помощи изопропанола и деионизованной воды. Затем подложки на 30 min помещались в смесь „Пирания“ ($\text{H}_2\text{O}_2 : 3\text{H}_2\text{SO}_4$) для очистки от органики. После пребывания в смеси все подложки очищались большим количеством деионизованной воды вытирались насухо и продувались азотом для удаления частичек пыли. Затем образцы были помещены в вакуумную установку для физического осаждения из газовой фазы (Kurt J. Lesker, США), где на них сначала напылялось серебро, а после отжига серебра — алюминий. При каждом напылении производилась откачка камеры до вакуума порядка 10^{-6} Торр. Серебро напылялось с помощью резистивного нагрева вольфрамовой лодочки, алюминий — с помощью электронно-лучевого испарения. Контроль толщины и скорости во время каждого напыления производился резонансно-частотным методом.

Толщина пленки серебра составляла 15 nm, а скорость напыления 0.3 \AA/s . После напыления производился отжиг пленок серебра на воздухе для того, чтобы получить островковую пленку, в которой наблюдается локализованный плазмонный резонанс [13]. Отжиг производился

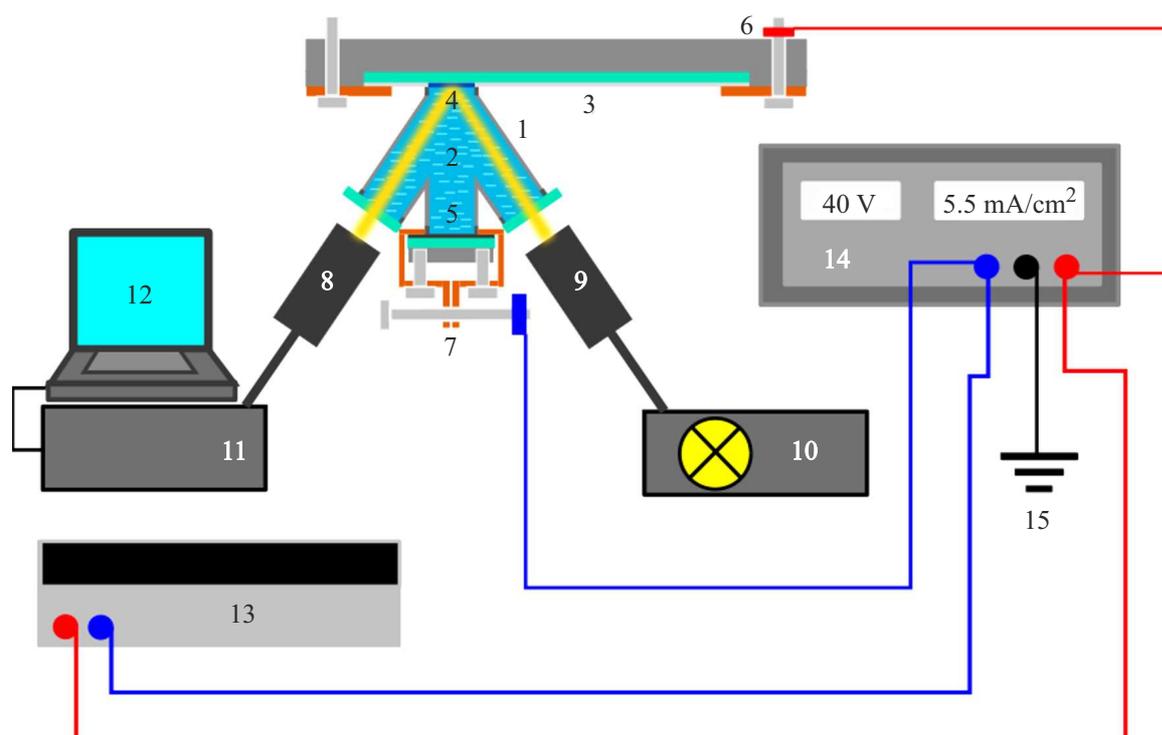


Рис. 1. Схема электрохимической ячейки со спектральным контролем: 1 — корпус ячейки с изоляционными прокладками; 2 — рабочее пространство с электролитом; 3 — образец; 4 — анодируемая зона образца; 5 — графитовый катод; 6 — медный электрод; 7 — корпус катода; 8 — детектор; 9 — волоконный вывод лампы; 10 — лампа; 11 — блок спектрометра; 12 — компьютер; 13 — лабораторный мультиметр; 14 — лабораторный блок питания; 15 — заземление.

при температуре 250°C , которая контролировалась термопарой.

После отжига сверху были напылены пленки алюминия толщиной 160 nm . При напылении алюминия соблюдался тот же режим вакуума, что и при напылении серебра. Скорость напыления — 0.6 \AA/s . Далее пленки были подвергнуты анодированию.

Анодирование алюминия

Анодирование — сложный электрохимический процесс, в результате которого толщина пленки окисла, возникающей на поверхности алюминия в естественных условиях, может быть увеличена. В зависимости от электролита и плотности тока в электрохимической ячейке образующаяся окисная пленка может обладать большей или меньшей пористостью, причем при определенных условиях поры образуют регулярные структуры. Установка для анодирования тонких пленок представлена на рис. 1. Особенность этой установки в том, что процесс анодирования в ней может контролироваться методом рефлектометрии. В процессе анодирования тонких пленок в 0.3 M щавелевой кислоте при напряжении 40 V и плотности тока 5.5 mA/cm^2 регистрируются спектры отражения с интервалом 5 s . Регистрация спектров происходит при помощи волоконного многоканального спектрометра РМА-

12 (Hamamatsu, Япония). Контроль напряжения производится при помощи мультиметра АВМ-4403 (Aktakom-Iwatsu, Япония).

В процессе анодирования используется электролит при различных температурах. Температура электролита в случае от 0°C до 5°C поддерживается при помощи ледяной бани, в иных случаях при помощи печи со встроенной термопарой. Всего было использовано несколько температурных режимов при анодировании: $0\text{--}5^{\circ}\text{C}$ и 40°C .

Спектры отражения регистрировались до, во время и после анодирования гибридных пористых структур и анодного оксида алюминия. До и после анодирования получались спектры диффузного и полного отражения. Оба типа спектров регистрировались при помощи интегрирующей сферы на СФ-56 (ЛОМО Спектр, Россия). Спектры люминесценции регистрировались с помощью сканирующего лазерного конфокального микроскопа LSM710 (Zeiss, Германия). Кинетика затухания регистрировалась при помощи методики коррелированного счета фотонов на лазерном сканирующем микроскопе MicroTime100 (PicoQuant, Германия). Рельеф структуры исследовался при помощи сканирующего электронного микроскопа Merlin (Zeiss, Германия) и атомно-силового микроскопа Solver PRO-M (НТ-МДТ, Россия).

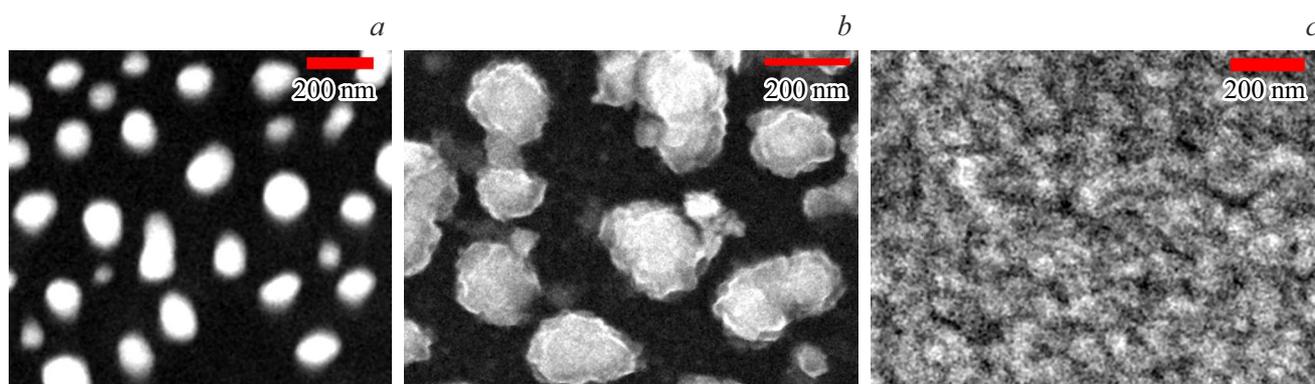


Рис. 2. Изображения серебряной островковой пленки (а), гибридной структуры (b) и тонкой пленки алюминия до анодирования (с), полученные на сканирующем электронном микроскопе.

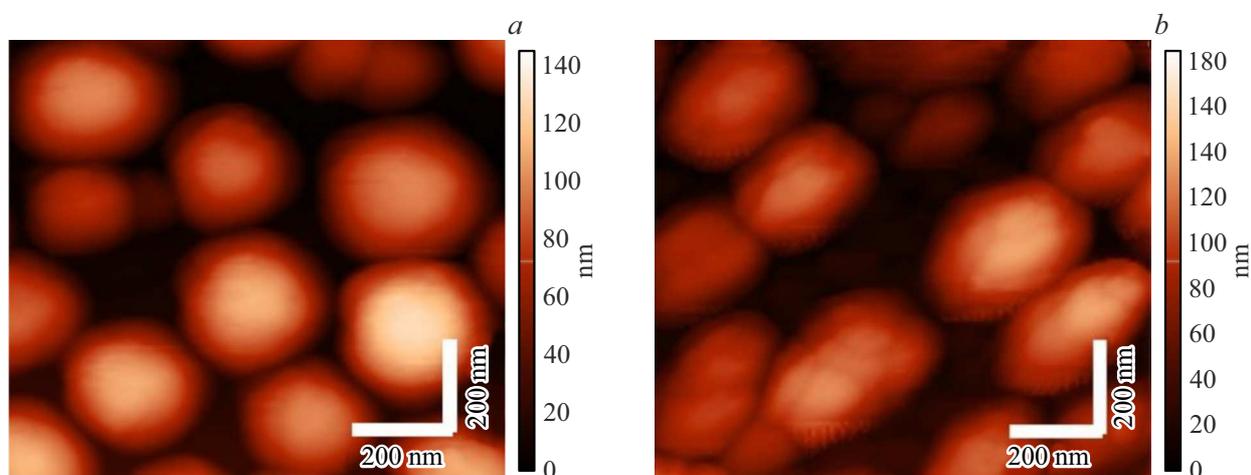


Рис. 3. Изображения плазмонных наночастиц (а) и гибридной структуры до анодирования (b), полученные на атомно-силовом микроскопе.

Нанесение красителей

В качестве красителя в работе был выбран Родамин 6Ж, так как его оптические свойства описаны в большом количестве работ. Внедрение красителя происходило при пропитке оксида алюминия как на стекле, так и на наночастицах серебра спиртовым раствором роданина 6Ж концентрацией $2 \cdot 10^{-4}$ М при 60°C в течение суток. Спектры люминесценции и кинетика затухания регистрировались как до, так и после пропитки.

Результаты и обсуждение

Строение

Изображения серебряной островковой пленки, гибридной структуры и тонкой пленки алюминия до анодирования, полученные на сканирующем электронном микроскопе, представлены рис. 2.

На изображениях представлены: массив наночастиц, обозначенный белым цветом, массив наночастиц под

пленкой алюминия, обозначенный светло-серым, а также рельеф пленки алюминия, напыленной на предметное стекло. Чем светлее зона на снимке, тем больше вторичных электронов, рассеянных образцом, попадает на детектор.

Изображения структур, полученные на атомно-силовом микроскопе, представлены на рис. 3.

На изображении представлен массив плазмонных серебряных наночастиц на воздухе, и под пленкой алюминия, соответственно. Высота на изображениях представлена цветом. АСМ-изображения хорошо согласуются с СЭМ-изображениями. Для гибридной структуры также наблюдается неоднородная структура наночастиц после напыления алюминия.

Изображения, полученные на сканирующем электронном микроскопе после анодирования тонких пленок алюминия и гибридных структур представлены на рис. 4.

Изображение анодированной гибридной пористой структуры, полученное на атомно-силовом микроскопе, представлено на рис. 5.

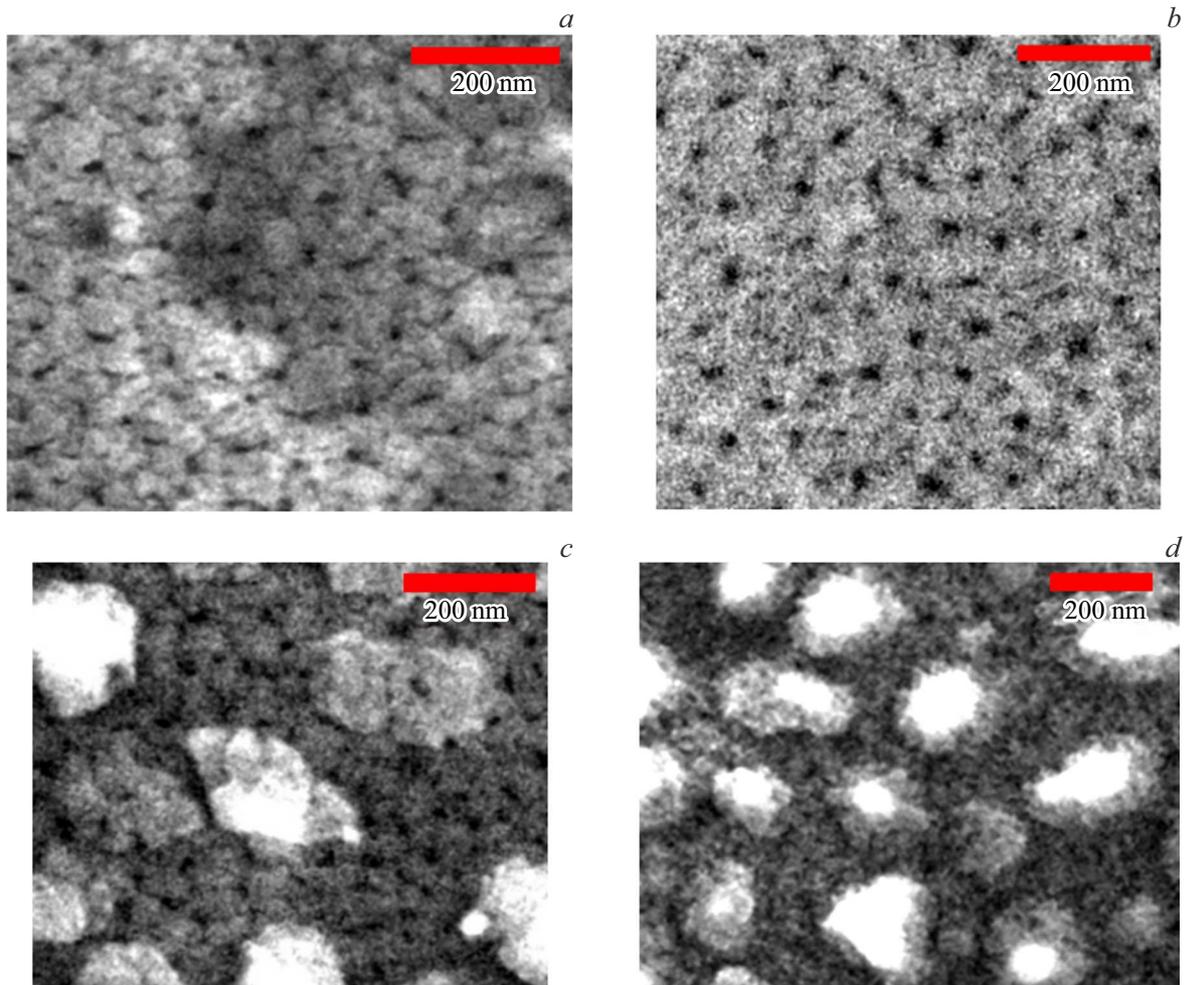


Рис. 4. Изображения оксида алюминия, анодированного при 5°C (*a*) и при 40°C (*b*), а также гибридной пористой структуры, анодированной при 5°C (*c*) и при 40°C (*d*), полученные на сканирующем электронном микроскопе.

Серебряные наночастицы (рис. 2, *a*) образуют белые области с латеральными размерами порядка 100 nm. Эти частицы создают рельеф, который сохраняется при нанесении на них пленки алюминия (рис. 2, *b*). При этом структура частиц становится более зернистой, как у пленки алюминия (рис. 2, *c*).

Белые области обозначают именно рельеф, так как на изображениях, полученных на атомно-силовом микроскопе, наблюдается похожая картина в виде выступающих областей, обозначенных более светлым тоном. При этом явление зарядки поверхности диэлектрика вследствие бомбардировки электронами исключается.

Практически на всех изображениях образцов, подвергнутых анодированию, видна пористая структура анодного оксида алюминия. Белые зоны являются рельефом и имеют ту же самую высоту, что и до анодирования, как показано на соответствующем АСМ-изображении.

АСМ-изображение на рис. 5 подтверждает, что белые пятна на СЭМ-изображениях обозначают рельеф структуры.

Отражение

При вычитании спектров диффузного отражения из спектров полного отражения можно получить спектры зеркального отражения, аналогичные которым регистрировались в процессе анодирования. Спектры полного и диффузного отражения гибридной структуры и пленки алюминия до анодирования в сравнении со спектрами плазмонных наночастиц представлены на рис. 6.

На рисунке представлены спектры полного, диффузного и зеркального отражения серебряной островковой пленки, пленки алюминия и островковой пленки под пленкой алюминия. Под спектром полного отражения понимается сумма спектров зеркального и диффузного отражения.

Спектры зеркального отражения, полученные в процессе анодирования на многоканальном спектрометре РМА-12 (Hamamatsu, Япония), представлены на рис. 7.

На рисунке представлены спектры отражения анодного оксида алюминия, зарегистрированные в процессе анодирования. Цветовым кодом обозначено время ре-

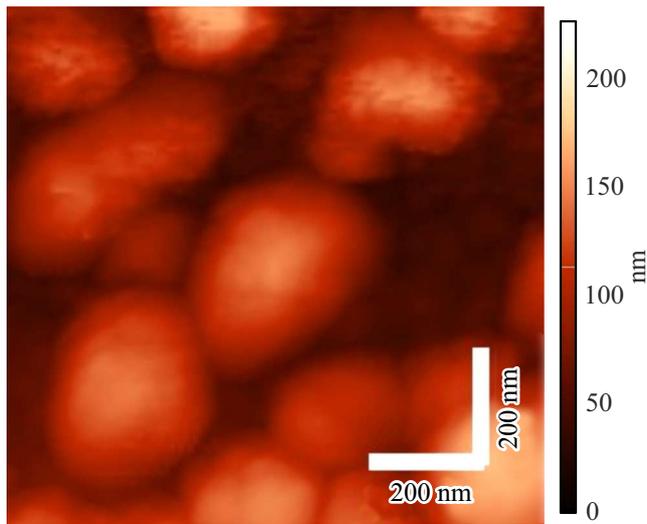


Рис. 5. Изображение гибридной структуры, анодированной при 40°C, полученное на атомно-силовом микроскопе.

гистрации спектра, отсчитываемое от начала процесса. Это время показано на отдельной шкале около каждого графика. В качестве образца сравнения во всех случаях использовался образец тонкой пленки алюминия до анодирования.

Спектры отражения пленок алюминия, анодированных при разных температурах представлены на рис. 8.

Спектры отражения (рис. 8) зарегистрированы и представлены аналогично спектрам отражения до анодирования образцов.

На спектрах отражения серебра (рис. 6) наблюдается полоса с максимумом на 500 nm, соответствующая плазмонному резонансу структуры. Полоса наблюдается как в спектрах зеркального отражения, так и в спектрах полного отражения и диффузного отражения частиц, что характерно для крупных частиц [14]. Минимум в спектре полного отражения на 850 nm отвечает собственным оптическим характеристикам алюминия [15]. У гибридной структуры в спектрах зеркального отражения в синей области наблюдается минимум около 300 nm, возможно, обусловленный рэлеевским рассеянием на неровностях, порожденных наночастицами под слоем алюминия.

На спектрах отражения, полученных в процессе анодирования для разных температур электролита (рис. 7), наблюдаются отличия в конечном среднем значении коэффициента отражения для оксидных пленок. Объясняются они балансом реакций окисления и растворения пленок. Эти реакции влияют на пористость пленок, как следствие — на показатель преломления нанопористого оксида алюминия, а следовательно и на его спектр отражения. При более высокой температуре электролита, отражение оксидной пленки изменяется быстрее, что связано с увеличением скоростей реакций окисления и растворения оксида. Такие же закономерности

наблюдаются и для толстых пленок оксида алюминия, анодированных в алюминиевой фольге [16].

Спектры отражения пленок анодного оксида алюминия, полученные после анодирования (рис. 8) для обеих температур электролита имеют схожий вид, что может говорить о том, что пленка алюминия анодировалась полностью при обеих температурах. Для гибридных структур анодирование при разных температурах дает разные спектры отражения, форма которых обусловлена различиями между спектром полного отражения и диффузного отражения. В случае анодирования при более низких температурах в спектре полного отражения гибридной пористой структуры наблюдается плазмонный максимум, а диффузное отражение по форме напоминает диффузное отражение оксида алюминия. В случае более высоких температур анодирования, наоборот, спектр полного отражения по форме напоминает спектр оксида алюминия, а в спектре диффузного отражения виден плазмонный максимум. При вычитании спектров диффузного отражения из спектров полного отражения в первом случае в отражении появляется максимум, а во втором минимум на длине волны максимума плазмонного резонанса. Так как в обоих случаях оптические характеристики оксида алюминия без наночастиц отличаются друг от друга незначительно, предположительно влияние на спектр зеркального отражения и диффузного отражения оказывают плазмонные наночастицы под матрицей. Для установки характера влияния, требуется рассмотреть температурную зависимость спектров отражения более подробно. Для этого требуется дополнительное исследование.

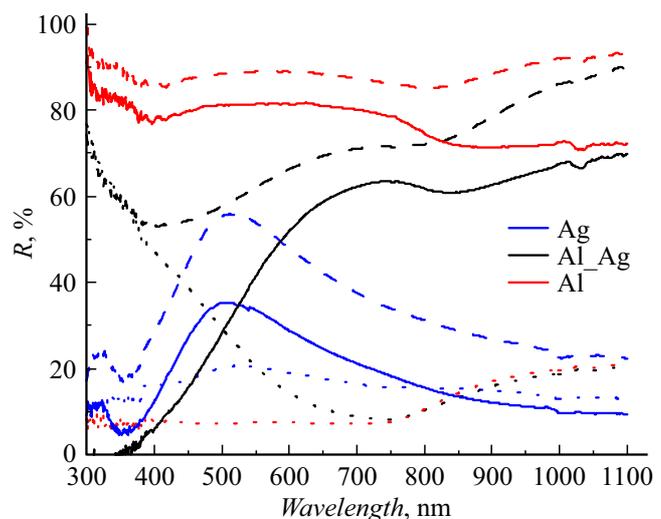


Рис. 6. Спектры зеркального отражения (сплошная линия), полного отражения (штриховая линия) и диффузного отражения (пунктирная линия) плазмонных наночастиц (синий цвет), а также алюминиевых пленок (красный цвет) и гибридных структур до анодирования (черный цвет).

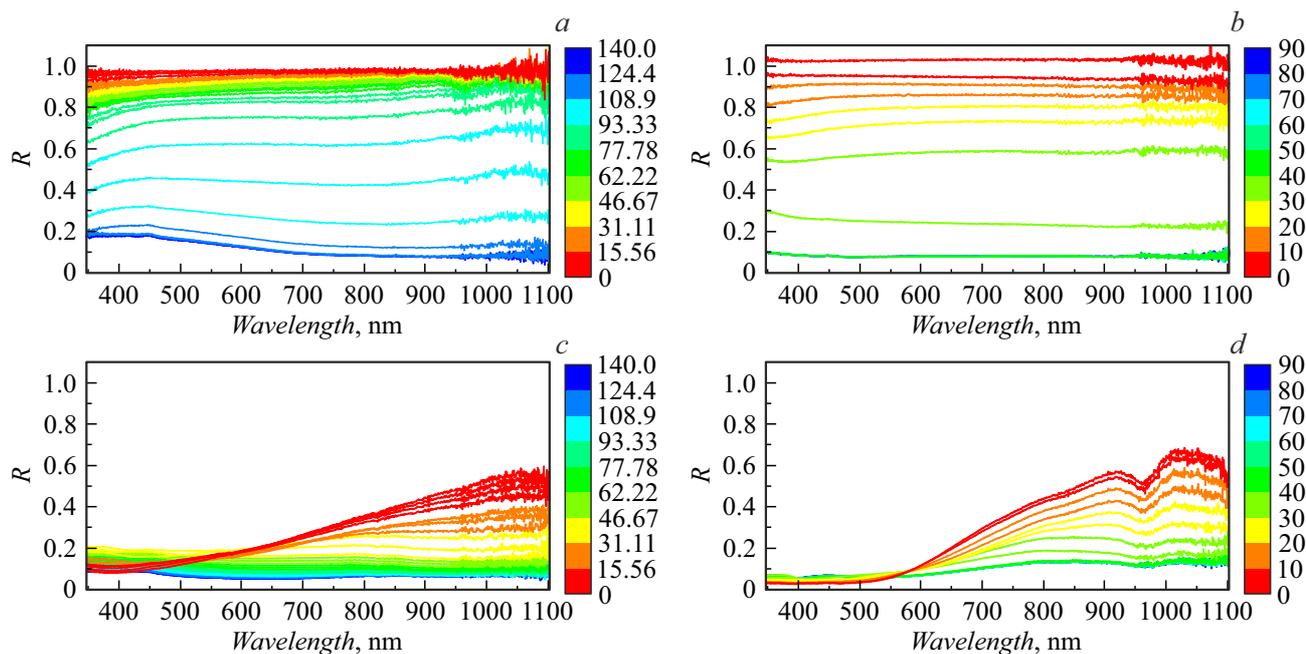


Рис. 7. Спектры зеркального отражения оксида алюминия, анодированного при 5°C (a) и при 40°C (b), а также гибридной пористой структуры, анодированной при 5°C (c) и при 40°C (d), полученные на многоканальном спектрометре с интервалом 5 с. Время анодирования в секундах обозначено цветовым кодом в столбцах справа от графиков.

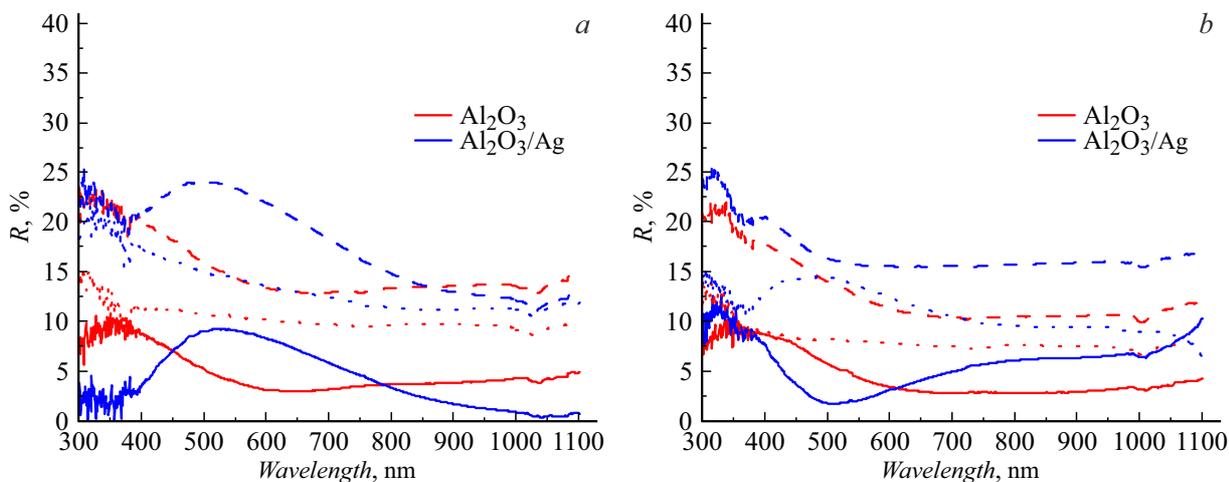


Рис. 8. Спектры зеркального отражения (сплошная линия), полного отражения (штриховая линия) и диффузного отражения (пунктирная линия) оксид-алюминиевых пленок (красный цвет) и гибридных пористых структур (синий цвет), анодированных при 5°C (a) и при 40°C (b).

Люминесценция

Спектры люминесценции оксида алюминия и гибридных пористых структур, полученные на лазерном сканирующем конфокальном микроскопе LSM710 (Zeiss, Германия), представлены на рис. 9.

Спектры люминесценции, представленные выше, регистрировались в одинаковых условиях при одном и том же значении мощности возбуждаемого света. Люминесценция оксида алюминия в случае анодирования при температуре 40°C обладает более высокой интенсивно-

стью в сравнении с люминесценцией оксида, анодированного при температуре 5°C. Это может быть связано с образованием большего количества люминесцентных центров, дефектов в решетке оксида алюминия, а также карбоксильных групп, скоординированных на атомы алюминия, в процессе анодирования [17,18]. Люминесцентные центры могут выступать в качестве доноров энергии для люминесцирующих красителей [19]. Длинноволновый сдвиг максимума люминесценции красителя в оксидной матрице по сравнению с красителем на

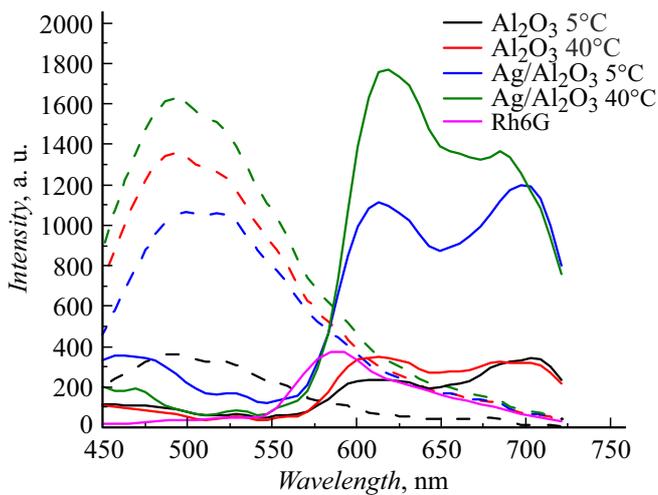


Рис. 9. Спектры люминесценции оксида алюминия (черный и красный цвета), а также гибридной пористой структуры (синий и зеленый цвета) с красителем (сплошная линия) и без него (штрихованная линия), а также спектр люминесценции Родамина 6Ж на стекле (розовый цвет). Длина волны возбуждения: 405 nm, Объектив: Zeiss FLUAR 20x 0.75NA, Плотность мощности: 8.31 mW/cm².

Таблица. Времена затухания люминесценции

Образец	Время затухания, ns
Ag/Al ₂ O ₃ 5°C	18.9 ± 0.1
Al ₂ O ₃ 5°C	19.6 ± 0.1
Ag/Al ₂ O ₃ 40°C	16.9 ± 0.1
Al ₂ O ₃ 40°C	20.3 ± 0.1

стекле, а также появление второго максимума может быть связано с агрегацией красителя на поверхности оксида алюминия, так как концентрация красителя для этого достаточно высока. У оксида алюминия в составе гибридных структур интенсивность люминесценции больше. Это усиление возникает вследствие эффекта Парселла при взаимодействии плазмонных наночастиц с люминесцентными центрами анодного оксида алюминия, что ведет к увеличению интенсивности люминесценции оксида алюминия, а также сокращает время её затухания, как показано в следующем разделе.

Кинетика люминесценции

На рис. 10. представлена кинетика затухания люминесценции образцов, анодированных при двух температурных режимах, полученная при помощи лазерного сканирующего микроскопа Olympus, подключенного к счетчику фотонов Microtime100 (PicoQuant, Германия).

Кинетика затухания люминесценции нормирована и представлена в логарифмическом масштабе для того, чтобы было легче сравнивать кинетику затухания для различных образцов. В таблице представлены средние

времена жизни возбужденных состояний для различных образцов, рассчитанные по формуле:

$$\tau_{av} = \frac{\int_0^{\tau_{max}} t^2 f(t) dt}{\int_0^{\tau_{max}} t f(t) dt}.$$

При более низких температурах электролита времена затухания люминесценции анодного оксида алюминия как на стекле, так и в составе гибридной пористой структуре увеличиваются. Это может происходить из-за того, что в структуре наблюдается меньше люминесцентных центров, на которых носители зарядов могут излучательно рекомбинировать. В присутствии плазмонных наночастиц время жизни возбужденного состояния в анодном оксиде алюминия уменьшается, что может быть связано с эффектом Парселла возникающим при взаимодействии плазмонных наночастиц с люминесцентными центрами анодного оксида алюминия. Малое время жизни возбужденного состояния при интенсивной люминесценции свидетельствует о высокой вероятности излучательного перехода в образце. Увеличение вероятности излучательного перехода может происходить из-за воздействия на излучающую систему внешнего электромагнитного поля, которое в данном случае, может возникать вблизи плазмонной наночастицы. При перекрытии спектров поглощения частиц и спектров люминесценции оксида алюминия может возникнуть положительная обратная связь, ведущая к увеличению интенсивности люминесценции всей системы в целом. Из-за этого эффекта и возникает увеличение интенсивности люминесценции оксида алюминия в составе гибридной пористой структуры, как показано на рис. 9.

Выводы

В работе были проанализированы морфология и оптические свойства гибридной структуры на основе серебряных плазмонных наночастиц и оксида алюминия, а также пленок анодного оксида алюминия в отдельности:

1. Природа изображений гибридной структуры до и после анодирования, обусловлена рельефом, создаваемым наночастицами, расположенными в основании этой структуры, что было установлено сопоставлением АСМ- и СЭМ-изображений.
2. В спектрах отражения, зарегистрированных до анодирования, минимум около 850 nm в спектре отражения алюминия обусловлен собственными оптическими свойствами алюминия, а минимум в области 300 nm — рэлеевским рассеянием на рельефе, порожденным серебряными наночастицами в основании.
3. В спектрах отражения, полученных во время анодирования, прослеживается увеличение скорости изменения коэффициента отражения при более высоких температурах электролита, что может означать увеличение

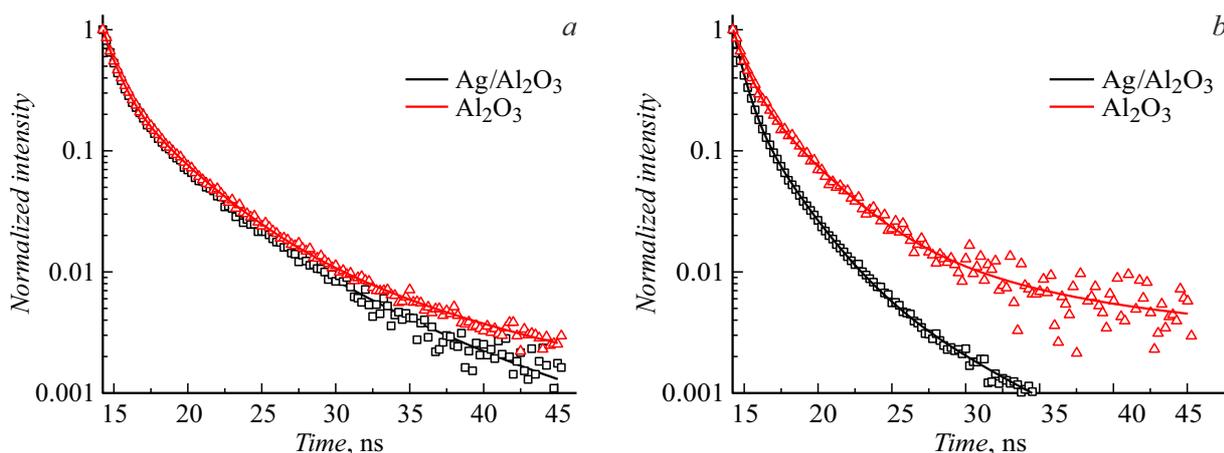


Рис. 10. Кинетика затухания люминесценции анодного оксида алюминия (красный), а также гибридных пористых структур (черный) при анодировании в электролите температурой 5°C (а) и 40°C (б). Сплошными линиями обозначены аппроксимирующие кривые на основе трехэкспоненциальных функций. Длина волны возбуждения 405 nm, Объектив: Olympus 40x 0.65NA. Плотность мощности: 49 mW/cm².

скорости самого процесса. Это связано с реакциями окисления и растворения оксида алюминия, скорость которых зависит в том числе от температуры и в этом тонкие пленки оксида алюминия ничем не отличаются от тех, что получают при анодировании толстых слоев алюминия [16].

4. В спектрах отражения, зарегистрированных после процесса анодирования, для анодного оксида алюминия больших качественных различий не наблюдается. Именно поэтому качественные отличия в спектрах отражения гибридных структур скорее всего могут быть обусловлены воздействием процесса анодирования на плазмонные наночастицы. Для установки характера этого воздействия требуется дополнительное исследование

5. В спектрах люминесценции гибридных структур с красителем и без него наблюдаются следующие закономерности. При добавлении красителя к оксиду алюминия как в составе структуры, так и на стекле, происходит тушение люминесценции оксида алюминия и разгорание люминесценции красителя. Это может быть связано с резонансным переносом энергии от люминесцентных центров, образовавшихся в оксиде при анодировании, к красителю, его молекулам и агрегатам. Возможно, краситель агрегировал в порах и на поверхности оксида, так как в сравнении со спектрами красителя на стекле, в оксиде алюминия и в гибридной структуре наблюдается длинноволновый сдвиг максимума люминесценции и образование второго максимума. В сравнении с оксидом алюминия, гибридная структура имеет более интенсивную люминесценцию, что может быть связано с эффектом Парселла, проявляющимся при взаимодействиях между люминесцентными центрами в оксиде алюминия и плазмонными наночастицами в основании гибридной структуры.

6. Наличие эффекта Парселла в структуре подтверждается кинетикой затухания образцов. В присутствии

плазмонных частиц время жизни люминесценции анодного оксида алюминия уменьшается, что может быть связано с увеличением вероятности излучательного перехода в люминесцентных центрах.

Наблюдаемые закономерности могут быть использованы для создания люминесцентных сенсоров, которые могут применяться в оптических сенсорах и приемниках оптического излучения.

Благодарности

Авторы благодарят А.В. Вениаминова за ценные замечания, высказанные в процессе написания работы.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-00045, <https://rscf.ru/project/23-72-00045/>

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Kondo, T. Sano, T. Yanagishita, H. Masuda, *J. Phys. Chem. C*, **127** (44), 21629 (2023). DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c05264
- [2] U. Malinovskis, R. Poplauskis, D. Ertis, K. Ramser, S. Tamulevičius, A. Tamulevičienė, Y. Gu, J. Prikulis, *Nanomaterials*, **9** (4), 531 (2019). DOI: 10.3390/nano9040531
- [3] W.J. Ho, P.Y. Cheng, K.Y. Hsiao, *Appl. Surf. Sci.*, **354**, 25 (2015). DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.05.049
- [4] O. Stranik, H.M. McEvoy, C. McDonagh, B.D. MacCraith, *Sensors Actuators, B Chem.*, **107** (1 spec. iss.), 148 (2005). DOI: 10.1016/j.snb.2004.08.032

- [5] I.Y. Nikitin, K.A. Maleeva, D. Kafeeva, A.V. Nashyokin, I.A. Gladskikh. In: *Proc. of SPIE/COS Photonics Asia 2023*, (SPIE, 2023), vol. 12774, p. 12774D-1, DOI: 10.1117/12.2686292
- [6] N.T.T. Phuong, T.A. Nguyen, V.T. Huong, L.H. Tho, D.T. Anh, H.K.T. Ta, T.H. Huy, K.T.L. Trinh, N.H.T. Tran, *Micromachines*, **13** (11), 1840 (2022). DOI: 10.3390/mi13111840
- [7] A.B. Taylor, P. Zijlstra, *ACS Sensors* **2** (8), 1103 (2017). DOI: 10.1021/acssensors.7b00382.
- [8] G. Sun, J.B. Khurgin, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **17** (1), 110 (2011). DOI: 10.1109/JSTQE.2010.2047249
- [9] C.R. Simovski, M.S.M. Mollaei, P.M. Voroshilov. *Phys. Rev. B*, **101** (24), 245421 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevB.101.245421
- [10] F. Reil, U. Hohenester, J.R. Krenn, A. Leitner, *Nano Lett.*, **8** (12), 4128 (2008). DOI: 10.1021/nl801480m
- [11] A. Mohammadpour, I. Utkin, S.C. Bodepudi, P. Kar, R. Fedosejevs, S. Pramanik, K. Shankar, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **13** (4), 2647 (2013). DOI: 10.1166/jnn.2013.7348
- [12] R.D. Nabiullina, I.Y. Nikitin, E.O. Soloveva, I.A. Gladskikh, A.A. Starovoytov. In: *Proc. of SPIE Photonics Europe 2022*, ed. by D.L. Andrews, A.J. Bain, J.-M. Nunzi (SPIE, Strasbourg, 2022), p. 6. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2621343>
- [13] N.A. Toropov, I.A. Gladskikh, P.S. Parfenov, T.A. Vartanyan, *Opt. Quantum Electron.* **49** (154), 1 (2017). DOI: 10.1007/s11082-017-0996-5
- [14] В. Климов, *Наноплазмоника*, 2-е изд. (Физматлит, Москва, 2010).
- [15] F. Cheng, P.H. Su, J. Choi, S. Gwo, X. Li, C.K. Shih, *ACS Nano*, **10** (11), 9852 (2016). DOI: 10.1021/acsnano.6b05556
- [16] Р.А. Мирзоев, А.Д. Давыдов, *Анодные процессы электрохимической обработки металлов*, 4-е изд. (Лань, Санкт-Петербург, Москва, Краснодар, 2022).
- [17] Y. Yamamoto, N. Baba, S. Tajima, *Nature*, **289**, 572 (1981).
- [18] Y. Du, W.L. Cai, C.M. Mo, J. Chen, L.D. Zhang, X.G. Zhu, *Appl. Phys. Lett.*, **74** (20), 2951 (1999). DOI: 10.1063/1.123976
- [19] A. Makhil, S. Sarkar, S.K. Pal, H. Yan, D. Wulferding, F. Cetin, P. Lemmens, *Nanotechnology*, **23** (30), 305705 (2012). DOI: 10.1088/0957-4484/23/30/305705