

НАНОСТРУКТУРЫ. СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ NANOSTRUCTURES. PROPERTIES AND APPLICATIONS

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-28-34

УДК 535. 016

Влияние параметров анодирования на оптические свойства нанопористого оксида алюминия, сформированного поверх островковой пленки серебра

Игорь Юрьевич Никитин¹✉, Резида Даниловна Набиуллина²,
Алексей Викторович Нашекин³, Антон Андреевич Старовойтов⁴,
Игорь Аркадьевич Гладских⁵

^{1,2,4,5} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

¹ nikitin0igor512@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0002-7911-9092>

² rezida2105@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1891-3057>

³ nashchekin@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2542-7364>

⁴ Anton.starovoytov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2160-1281>

⁵ 138020@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6389-1611>

Аннотация

Предмет исследования. Исследованы оптические свойства гибридной плазмонной тонкопленочной наноструктуры. Структура представляет собой пористую матрицу анодного оксида алюминия на поверхности островковой пленки серебра, сформированной на кварцевой подложке. **Метод.** Серебряная пленка из наночастиц, лежащая в основе структуры, создана методом термического напыления. Островковая структура серебра с размером наночастиц порядка 100 нм сформирована в процессе отжига на воздухе. На поверхность структуры методом электронно-лучевого испарения в вакууме нанесена пленка алюминия. Выполнено одноступенчатое прямое анодирование пленки алюминия, в результате которого образована нанопористая пленка оксида алюминия. Полученные структуры исследованы методами спектрометрии и электронной микроскопии. **Основные результаты.** Рассмотрены спектры отражения и оптической плотности наноструктур, полученные при различных продолжительности и токе анодирования. Выполнено сравнение полученных спектров наноструктур для оксида алюминия, серебряных наночастиц и оксида алюминия на поверхности серебряных наночастиц. Показано, что с увеличением времени анодирования, коэффициент отражения структуры приближается к величине показателя для анодного оксида алюминия, вследствие окисления алюминиевой пленки. Увеличение тока анодирования приводит к сдвигу минимума коэффициента отражения в длинноволновую область спектра. Это явление подтверждается ранее выполненными исследованиями и объясняется увеличением расстояния между порами, образующимися в результате анодирования. Численное моделирование спектров сечения экстинкции с использованием Mie калькулятора показало, что результаты моделирования оптических свойств структуры с размерами наночастицы порядка 100 нм сопоставимы со спектрами оптической плотности, полученными в результате эксперимента. При моделировании использовано приближение сферической частицы. Для более точного определения толщины оксидной пленки и приближения расчетных спектров оптической плотности к экспериментальным результатам требуется учет форм-фактора. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть использованы при проектировании и изготовлении сенсоров, оптических покрытий и источников фотонов для применения в экранах, оптических схемах и устройствах плазмоники.

Ключевые слова

локализованный плазмонный резонанс, нанопористый оксид алюминия, тонкие пленки, наночастицы, анодирование

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 21-72-10098, а также средств гранта поддержки научно-исследовательских работ бакалавров, магистров и аспирантов (НИР МиА) Университета ИТМО.

Ссылка для цитирования: Никитин И.Ю., Набиуллина Р.Д., Нащекин А.В., Старовойтов А.А., Гладских И.А. Влияние параметров анодирования на оптические свойства нанопористого оксида алюминия, сформированного поверх островковой пленки серебра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 1. С. 28–34. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-28-34

Anodization parameters influence on anodic aluminum oxide formed above the silver island film

Igor Yu. Nikitin^{1✉}, Rezida D. Nabiullina², Alexey V. Nashyokin³,
Anton A. Starovoytov⁴, Igor A. Gladskikh⁵

^{1,2,4,5} ITMO University Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

³ Ioffe Institute Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

¹ nikitin0igor512@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-7911-9092>

² rezida2105@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1891-3057>

³ nashchekin@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2542-7364>

⁴ Anton.starovoytov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2160-1281>

⁵ 138020@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6389-1611>

Abstract

Optical properties of hybrid plasmonic thin film structure in the form of anodic alumina porous matrix above silver island film on the quartz substrate have been investigated. Silver nanoparticle film in the bottom of the structure has been obtained by physical vapor deposition in a vacuum chamber. The silver island film with the island of average diameter of 100 nm has been formed after annealing in the air atmosphere. Above the silver nanoparticle film an aluminum film has been deposited by the E-beam evaporation. As a result of one-step straight anodization, a nanoporous alumina thin film has been formed. The obtained structures were investigated, using spectroscopy and electron microscopy methods. The structure reflectance and optical density spectra have been obtained and analyzed for different anodization times and currents. To compare the results, the reflectance and optical density spectra have been obtained for silver nanoparticles and anodic alumina. When anodization times are increased, structure reflection coefficient spectra become more like the same characteristic for anodic aluminum oxide, which can be explained by film oxidation. At the same time a red shift of reflectance spectrums is observed in the structures with bigger maximum anodization currents. This effect has been observed in other works and can be explained by the increasing distance between the pores. A numerical modeling of optical properties with the help of Mie calculator for the structure with the nanoparticle size of 100 nm has shown that the results of the modeling can be compared to the experimentally obtained optical density spectra. The modeling was performed using spherical approximation. To obtain more precise results for alumina film thickness and nanoparticle optical properties, a silver nanoparticle form factor has to be considered. The results of this work can be used in sensors, optical coatings and photon sources fabrication methods. These can be used in screens, optical schemes and many other plasmonic devices

Keywords

localized plasmon resonance, nanoporous alumina, thin films, nanoparticles, anodization

Acknowledgements

The research was financed by the Russian Science Foundation grant no. 21-72-10098 and by ITMO University science research bachelor, master and PhD student supporting grant.

For citation: Nikitin I.Yu., Nabiullina R.D., Nashyokin F.V., Starovoytov A.A., Gladskikh I.A. Anodization parameters influence on anodic aluminum oxide formed above the silver island film. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 28–34 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-28-34

Введение

С совершенствованием устройств плазмоники исследование оптических свойств гибридных плазмонных наноструктур на основе пористых матриц и металлических наночастиц оказывается актуальным. Вследствие усиленного поглощения и рассеяния света [1], а также способности к увеличению интенсивности собственного излучения объектов, помещенных в ячейки матрицы [2,3], такие структуры могут применяться в качестве источников одиночных фотонов в квантовых коммуникациях и фотонных компьютерах [4], усилителей поглощения в солнечных батареях [5], а также различного рода сенсоров и датчиков.

В последнее время создано большое количество образцов гибридных плазмонных наноструктур, на основе металлических пленок и нанопористых ма-

триц, полученных в результате анодирования [6–8]. Под нанопористой матрицей в данном случае рассматривается массив из квазицилиндрических несквозных отверстий, диаметром 11–37 нм в пленке оксида алюминия, образовавшийся в результате процесса анодирования, принципы которого подробно описаны в работах [9–12]. Глубина и диаметр отверстий зависят от условий анодирования. В настоящей работе предложен новый подход к созданию гибридных плазмонных наноструктур на основе нанопористых матриц, при котором металлические наночастицы располагаются в основании пор анодированного алюминия. Данная компоновка имеет существенные достоинства. Так, например, ближние поля металлических наночастиц, образующиеся при возбуждении локализованного плазмонного резонанса, фокусируются вблизи барьерного слоя диэлектрических пор оксида, где обычно оседают

исследуемые наноразмерные объекты, помещаемые в матрицу. К таким объектам могут относиться квантовые точки и красители [13, 14].

В работе рассмотрен метод получения гибридной структуры на основе островковой пленки серебра и тонкой пленки нанопористой матрицы оксида алюминия, а также влияние параметров анодирования на оптические свойства конечной гибридной структуры. Проведено сравнение спектров отражения и оптической плотности для серебряных наночастиц, тонкой пленки оксида алюминия и гибридной наноструктуры. Выполнено численное моделирование с целью определения возможных размеров серебряных наночастиц и толщины оксидной пленки на их поверхности в сферическом приближении. Рассмотрены спектры отражения в зависимости от времени и максимального тока анодирования.

Материалы и методы

Получение образцов гибридной плазмонной структуры включает следующие этапы.

Подготовка кварцевых подложек — обезжиривание и очищение в изопропанол и деионизованной воде. После высыхания — размещение подложек в вакуумной камере PVD-75 (Kurt J. Lesker Ltd.), где методом осаждения паров из газовой фазы напыляется пленка серебра (99,99 %) толщиной 15 нм [15]. Проведение отжига образцов на воздухе при температуре 200 °C в течение 1 ч для формирования отдельных островков серебра, благодаря явлению поверхностной диффузии. Повторное размещение подложек в вакуумную камеру и напыление пленки алюминия (99,999 %) эквивалентной толщины 100 и 160 нм. Испарение серебра и алюминия осуществляется при давлении остаточных паров порядка 10^{-6} торр резистивным нагревом и пучком высокоэнергетических электронов соответственно. После напыления алюминия осуществляется одноступенчатое прямое анодирование образцов в 0,3 М растворе щавелевой кислоты при постоянном напряжении 40 В [10, 12]. Перед анодированием каждого образца на блоке питания наблюдались изменения значений тока. В качестве оптимальных параметров структуры с толщиной алюминия 160 нм выбраны параметры анодирования 45 с при 0,15 А максимального тока анодирования, которые использованы при сравнении гибрид-

ной структуры с пористой матрицей без серебряных наночастиц и островковой пленки серебра. Данные для экспериментов по варьированию параметров анодирования представлены в таблице.

Эквивалентная толщина характеризует количество материала, которое может содержаться в плоской тонкой пленке материала. В данной работе эквивалентная толщина измерена при помощи измерительного блока установки Sigma 242 (Sigma Instruments) резонансно-частотным методом.

После каждого анодирования образцы структуры вместе с контактами были несколько раз промыты деионизованной водой и высушены в вытяжном шкафу.

На каждом этапе эксперимента получены спектры оптической плотности образцов на спектрофотометре СФ-56 (ЛОМО) и спектры отражения на спектрометре РМА-12 (Hamamatsu) при угле падения 45°. Морфология образцов исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (JEOL).

Результаты и обсуждение

В результате эксперимента получена гибридная тонкопленочная структура на основе пористой матрицы оксида алюминия поверх серебряной островковой пленки серебра (Ag). На рис. 1 показаны схематичные изображения серебряной островковой пленки из наночастиц и вид структуры, а также их СЭМ-изображения.

В основании пористой матрицы обнаружены металлические наночастицы диаметром более 100 нм, покрытые пленкой анодированного алюминия. Спектры оптической плотности и отражения серебряных наночастиц анодированного алюминия (эквивалентная толщина алюминия 160 нм, время анодирования — 45 с) без наночастиц и гибридной структуры (эквивалентные толщины серебра — 15 нм и алюминия — 160 нм, время анодирования — 45 с) представлены на рис. 2. В спектрах оптической плотности и отражения серебряной пленки наблюдается максимум на длине волны около 600 нм, связанный с возбуждением плазмонного резонанса серебряных наночастиц [16, 17]. Большая ширина спектра вызвана широким распределением частиц по формам и размерам в процессе самоорганизации при напылении и отжиге пленки.

Спектры оптической плотности и отражения анодированного алюминия монотонно возрастают с увеличе-

Таблица. Данные экспериментов по вариации параметров анодирования

Table. Anodization parameters variation experiments data

Эксперимент	Эквивалентная толщина, нм		Время анодирования, с	Максимальный ток анодирования, А
	серебра	алюминия		
Вариация времени анодирования	15,4 ± 0,2	100,4 ± 12,9	40	0,150
			60	0,150
			50	0,150
Вариация максимального тока анодирования			40	0,150
			40	0,234
			40	0,402

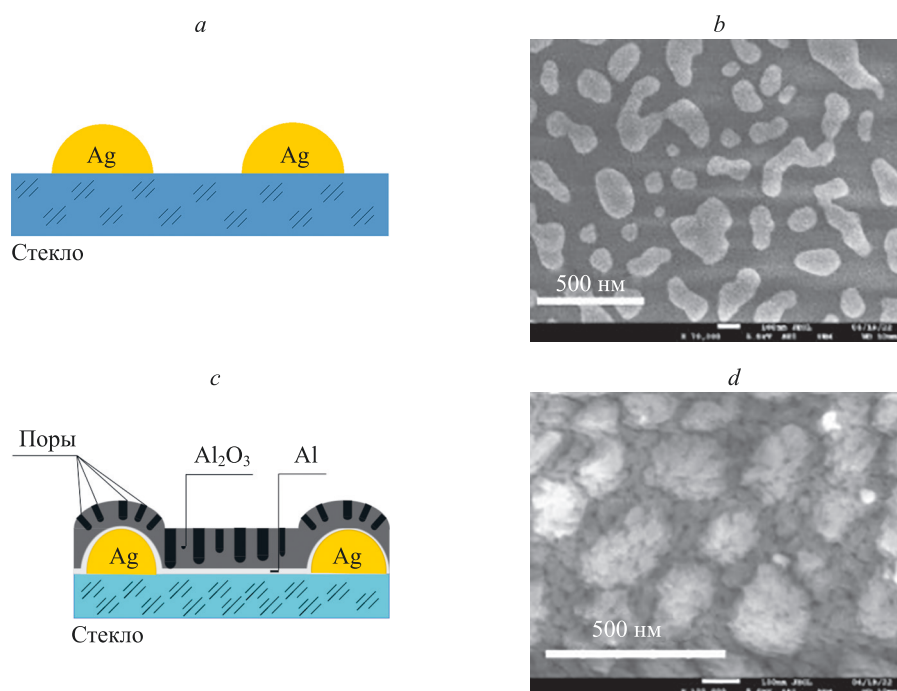


Рис. 1. Схематичное изображение (a) и СЭМ-изображение (b) серебряной островковой пленки; схема (c) и СЭМ-изображение (d) гибридной плазмонной оксид-алюминиево-серебряной структуры.

Цветовые обозначения: темно-серый — анодный оксид алюминия (Al₂O₃); черный — поры; светло-серый — алюминий (Al); желтый — серебряные наночастицы (Ag); синий — кварцевая подложка

Fig. 1. Suggested scheme for a silver island film (a). SEM Image of the silver island film (b). Suggested scheme of hybrid plasmonic alumina-silver structure. Dark-grey — anodic alumina, black — pores, light-grey — aluminum, yellow — silver nanoparticles, blue — quartz substrate (c). Hybrid structure SEM image (d)

нием длины волны, что может быть связано с наличием остаточной пленки алюминия в процессе анодирования. Большая величина оптической плотности может быть также связана с сильным рассеянием света на пористой структуре анодированного алюминия.

В результате видно, что форма спектров отражения и оптической плотности схожи для чистой пленки серебра и анодированного алюминия соответственно. Для гибридной структуры спектр оптической плотности больше похож на спектр серебряной пленки, со сме-

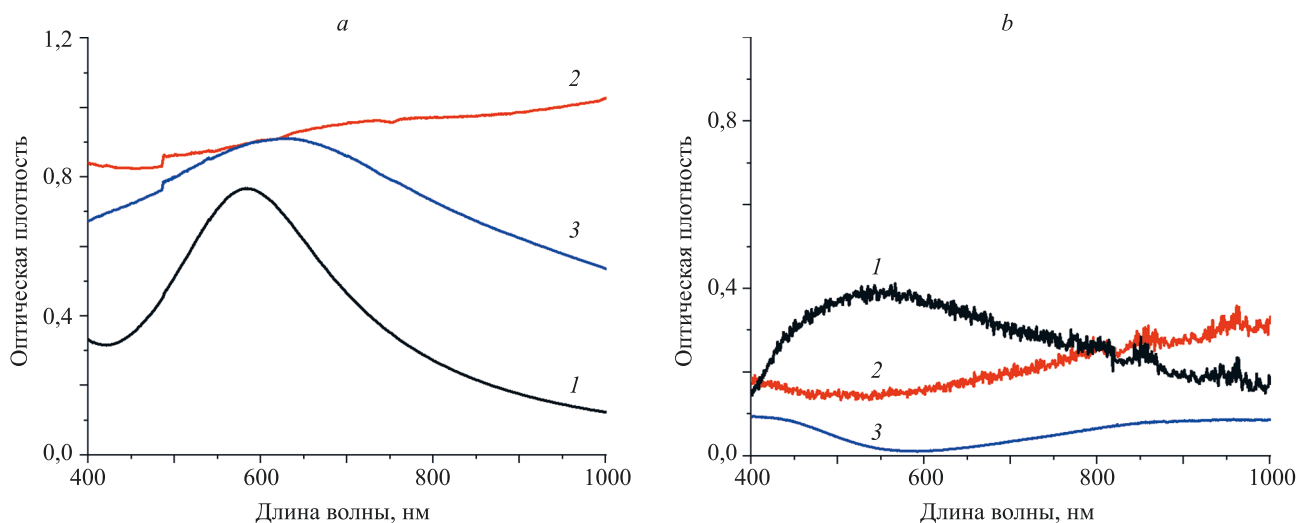


Рис. 2. Спектры оптической плотности (a) и отражения (b) серебряных наночастиц (кривая 1), анодного оксида алюминия (кривая 2) и гибридной наноструктуры (кривая 3)

Fig. 2. Optical density (a) and reflection (b) spectra of silver nanoparticles (curve 1), anodic alumina (curve 2), hybrid nanostructure (curve 3)

щенным в длинноволновую область спектра плазмонным резонансом. Одновременно в спектре отражения на длине волны плазмонного резонанса наблюдается минимум, а форма спектра близка к анодированному алюминию, с меньшим по величине отражением.

Данные результаты можно объяснить следующим образом. Известно, что основной вклад в экстинкцию крупных металлических наночастиц вносит рассеяние на них света, что демонстрируют спектры отражения. Для анодированного оксида алюминия отражение будет как от самого оксида алюминия, так и от поверхности подложки. Отметим, что большой вклад в отражение может вносить остаточная тонкая пленка чистого алюминия, а в спектр оптической плотности — рассеяние света на неоднородной пористой структуре анодированного алюминия.

Сдвиг максимума оптической плотности в длинноволновую область спектра может быть связан с наличием пленки оксида алюминия на поверхности серебряных наночастиц. Численное моделирование при помощи Мие калькулятора¹ показало, что на поверхности частиц может присутствовать пленка оксида алюминия толщиной до 10 нм. Радиус при моделировании равен 100 нм. Фактический радиус частицы может отличаться, так как форма частиц отлична от сферической. В качестве данных показателя преломления были взяты данные Ag_McPeak² и Al₂O₃ Query³. Сравнение спектров оптической плотности образца и спектра сечения экстинкции, полученного в результате численного моделирования, представлено на рис. 3.

На рис. 3 видно, что максимумы сечения экстинкции и оптической плотности находятся на длине волны 630 нм. В то время, как максимум оптической плотности серебряных наночастиц (рис. 2) — на длине волны 580 нм. Длинноволновый сдвиг вызывается оксидной пленкой на поверхности частиц.

Спектры отражения гибридных образцов в зависимости от времени анодирования показаны на рис. 4, а. Характер изменений отражения гибридной пленки при увеличении максимального тока анодирования может быть проанализирован, исходя из спектров на рис. 4, б.

Заметим, что с увеличением времени анодирования, отражение уменьшается, что соответствует уменьшению слоя чистого алюминия при анодировании в щавелевой кислоте. Электролит, в котором происходит анодирование, — агрессивная среда, которая влияет на размер пор. Чем больше и глубже поры, тем больше света через них проходит, и тем меньше света рассеивается и отражается назад. Видно, что отражение и рассеяние света существенно в длинноволновой области, где у алюминия повышенное отражение. Это

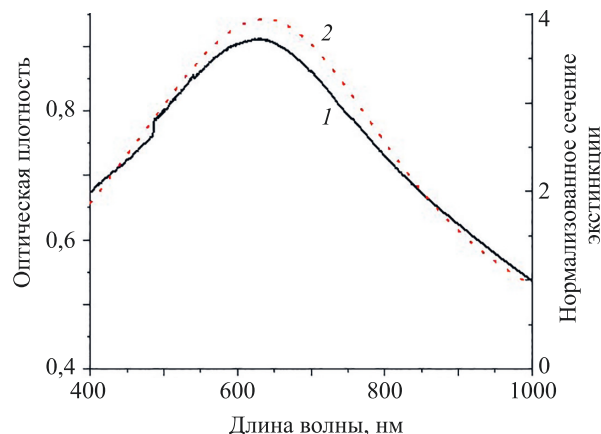


Рис. 3. Сравнение спектров оптической плотности гибридной пленки (кривая 1) и сечения экстинкции (кривая 2), полученного при численном моделировании

Fig. 3. Comparison of the optical density spectra of the hybrid film (curve 1) and the extinction cross section (curve 2) obtained by numerical simulation

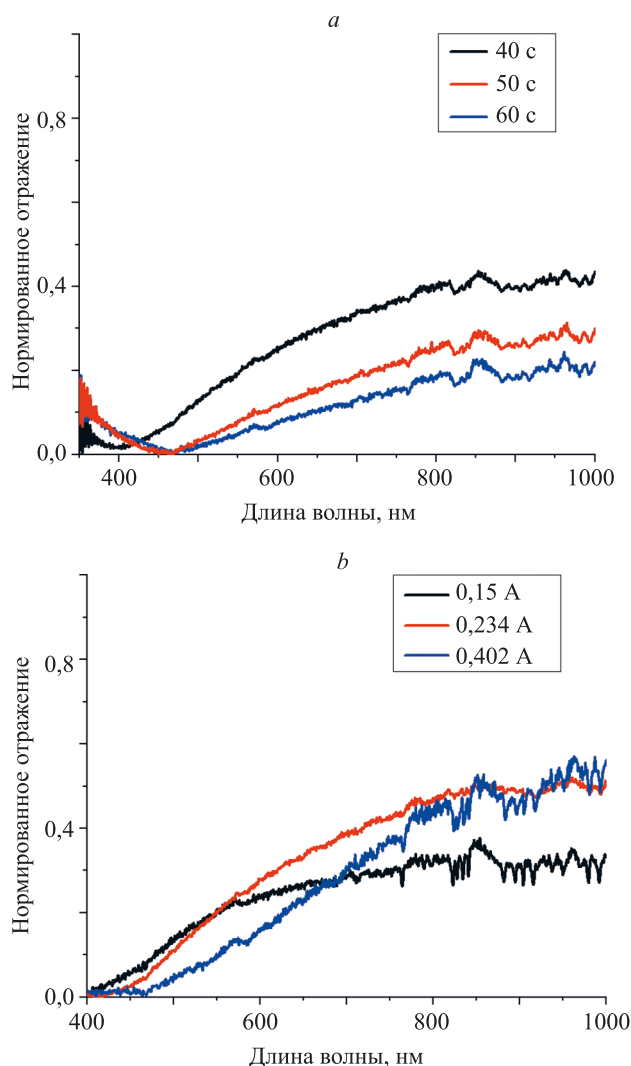


Рис. 4. Спектры отражения гибридных структур при различной длительности (а) и максимальном значении тока анодирования (б)

Fig. 4. Reflection spectra of hybrid structures at different duration (a) and maximum anodization current value (b)

¹ Мие калькулятор | Новый физтех. Университет ИТМО [Электронный ресурс]. URL: <https://physics.itmo.ru/ru/mie#/spectrum> (дата обращения: 26.07.2022).

² Refractive index of Ag (Silver) — McPeak [Электронный ресурс]. URL: <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Ag&page=McPeak> (дата обращения: 10.12.2022).

³ Refractive index of Al₂O₃ (Aluminium sesquioxide, Sapphire, Alumina) — Query [Электронный ресурс]. URL: <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Al2O3&page=Query> (дата обращения: 10.12.2022).

может указывать на присутствие в образцах остаточной алюминиевой пленки.

При изменении тока анодирования изменяется форма спектра. Минимум отражения начинает сдвигаться в длинноволновую область. Известно, что при увеличении потенциала, а также тока анодирования толстых пленок оксида алюминия, увеличивается дистанция между порами [11]. При увеличении потенциала или тока анодирования, некоторые поры перегреваются вследствие локального выделения джоулева тепла и разрушаются. В результате этого дистанция между уцелевшими порами увеличивается, что может влиять на длинноволновый сдвиг минимума поглощения [9].

Заключение

В работе созданы гибридные наноструктуры на основе пористой матрицы анодного оксида алюминия на поверхности островковой пленки серебра. Представляют интерес малые значения коэффициента отражения на длине волны максимума оптической плотности наночастиц. Этот феномен требует дальнейшего исследования, так как для обыкновенных серебряных наночастиц или чистой пленки оксида алюминия пониженного коэффициента отражения не наблюдается.

Длинноволновый сдвиг максимумов оптических плотностей гибридной структуры и серебряных наночастиц относительно друг друга может быть объяснен присутствием тонкой пленки оксида алюминия толщиной до 10 нм на поверхности серебряных наночастиц. Данное предположение подтверждено численным моделированием. Отметим, что при построении модели частица считалась сферической, поэтому необходимо учесть форм-фактор и факт присутствия подложки для последующих моделей. Также это связано с тем, что форма влияет на спектр оптической плотности частиц. В зависимости от тока и времени анодирования спектры отражения и оптической плотности наноструктур изменились. При увеличении тока анодирования произошел сдвиг минимума отражения в длинноволновую область, что может быть связано с изменением дистанции между порами. С увеличением времени анодирования значение коэффициента отражения уменьшалось, что может быть связано с увеличением пропускания материала из-за увеличения размеров и глубины пор анодного оксида алюминия. В дальнейшем следует произвести опыты с большим количеством образцов для увеличения статистической выборки. Данная структура имеет потенциал для использования в сенсорике, светодиодах и оптических покрытиях.

Литература

1. Maoz B.M., Chaikin Y., Tesler A.B., Bar Elli O., Fan Z., Govorov A.O., Markovich G. Amplification of chiroptical activity of chiral biomolecules by surface plasmons // *Nano Letters*. 2013. V. 13. N 3. P. 1203–1209. <https://doi.org/10.1021/nl304638a>
2. Xu S., Cao Y., Zhou J., Wang X., Wang X., Xu W. Plasmonic enhancement of fluorescence on silver nanoparticle films // *Nanotechnology*. 2011. V. 22. N 27. P. 275715. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/27/275715>
3. Choudhari K.S., Kulkarni S.D., Santhosh C., George S.D. Photoluminescence enhancement and morphological properties of nanoporous anodic alumina prepared in oxalic acid with varying time and temperature // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2018. V. 271. P. 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.06.004>
4. Zhou Z.K., Lei D.Y., Liu J., Liu X., Xue J., Zhu Q., Chen H., Liu T., Li Y., Zhang H., Wang X. Shaping the emission spectral profile of quantum dots with periodic dielectric and metallic nanostructures // *Advanced Optical Materials*. 2014. V. 2. N 1. P. 56–64. <https://doi.org/10.1002/adom.201300354>
5. Ho W.J., Cheng P.Y., Hsiao K.Y. Plasmonic silicon solar cell based on silver nanoparticles using ultra-thin anodic aluminum oxide template // *Applied Surface Science*. 2015. V. 354. P. 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.05.049>
6. Xu Q., Sun H.-Y., Yang Y.-H., Liu L.-H., Li Z.-Y. Optical properties and color generation mechanism of porous anodic alumina films // *Applied Surface Science*. 2011. V. 258. N 5. P. 1826–1830. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.10.054>
7. Bae Y., Yu J., Jung Y., Lee D., Choi D. Cost-effective and high-throughput plasmonic interference coupled nanostructures by using quasi-uniform anodic aluminum oxide // *Coatings*. 2019. V. 9. N 7. P. 420. <https://doi.org/10.3390/coatings9070420>
8. Wang X.G., Wang J., Li J.-F., Tao D.-W., Zhou W.-M., Li Y., Wang C.-W. Silver loaded anodic aluminum oxide defective photonic crystals and their application for surface enhanced Raman scattering // *Optical Materials*. 2020. V. 105. P. 109982. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109982>
9. Santos A. Nanoporous anodic alumina photonic crystals: Fundamentals, developments and perspectives // *Journal of Materials Chemistry C*. 2017. V. 5. N 23. P. 5581–5599. <https://doi.org/10.1039/c6tc05555a>

References

1. Maoz B.M., Chaikin Y., Tesler A.B., Bar Elli O., Fan Z., Govorov A.O., Markovich G. Amplification of chiroptical activity of chiral biomolecules by surface plasmons. *Nano Letters*, 2013, vol. 13, no. 3, pp. 1203–1209. <https://doi.org/10.1021/nl304638a>
2. Xu S., Cao Y., Zhou J., Wang X., Wang X., Xu W. Plasmonic enhancement of fluorescence on silver nanoparticle films. *Nanotechnology*, 2011, vol. 22, no. 27, pp. 275715. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/27/275715>
3. Choudhari K.S., Kulkarni S.D., Santhosh C., George S.D. Photoluminescence enhancement and morphological properties of nanoporous anodic alumina prepared in oxalic acid with varying time and temperature. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, vol. 271, pp. 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.06.004>
4. Zhou Z.K., Lei D.Y., Liu J., Liu X., Xue J., Zhu Q., Chen H., Liu T., Li Y., Zhang H., Wang X. Shaping the emission spectral profile of quantum dots with periodic dielectric and metallic nanostructures. *Advanced Optical Materials*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 56–64. <https://doi.org/10.1002/adom.201300354>
5. Ho W.J., Cheng P.Y., Hsiao K.Y. Plasmonic silicon solar cell based on silver nanoparticles using ultra-thin anodic aluminum oxide template. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 354, pp. 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.05.049>
6. Xu Q., Sun H.-Y., Yang Y.-H., Liu L.-H., Li Z.-Y. Optical properties and color generation mechanism of porous anodic alumina films. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 258, no. 5, pp. 1826–1830. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.10.054>
7. Bae Y., Yu J., Jung Y., Lee D., Choi D. Cost-effective and high-throughput plasmonic interference coupled nanostructures by using quasi-uniform anodic aluminum oxide. *Coatings*, 2019, vol. 9, no. 7, pp. 420. <https://doi.org/10.3390/coatings9070420>
8. Wang X.G., Wang J., Li J.-F., Tao D.-W., Zhou W.-M., Li Y., Wang C.-W. Silver loaded anodic aluminum oxide defective photonic crystals and their application for surface enhanced Raman scattering. *Optical Materials*, 2020, vol. 105, pp. 109982. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109982>
9. Santos A. Nanoporous anodic alumina photonic crystals: Fundamentals, developments and perspectives. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, vol. 5, no. 23, pp. 5581–5599. <https://doi.org/10.1039/c6tc05555a>

10. Liu S., Tian J., Zhang W. Fabrication and application of nanoporous anodic aluminum oxide: A review // *Nanotechnology*. 2021. V. 32. N 22. P. 222001. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abe25f>
11. Kumeria T., Santos A. Nanoporous alumina membranes for chromatography and molecular transporting // *Springer Series in Materials Science*. 2015. V. 219. P. 293–318. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20334-8_10
12. Alekseeva N., Cema G., Podorozhkin D., Solovyev V., Trifonov S., Veisman V. Physical properties of self-assembled porous alumina structures filled with iodine // *Journal of Self-Assembly and Molecular Electronics (SAME)*. 2015. V. 2. N 1. P. 27–40. <https://doi.org/10.13052/jsame2245-4551.212>
13. Yin H., Li X., Que L. Fabrication and characterization of aluminum oxide thin film micropatterns on the glass substrate // *Microelectronic Engineering*. 2014. V. 128. P. 66–70. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2014.05.020>
14. Nabiullina R.D., Nikitin I., Soloveva E., Gladskikh I., Starovoytov A.A. Optical properties of nanoporous aluminum oxide activated by molecular clusters of pseudocyanine dye // *Proceedings of SPIE*. 2022. V. 12131. P. 121310S. <https://doi.org/10.1117/12.2621343>
15. Toropov N.A., Gladskikh I.A., Parfenov P.S., Vartanyan T.A. Fabrication and laser-assisted modification of the Ag particles ensembles supporting quadrupole plasmon oscillations // *Optical and Quantum Electronics*. 2017. V. 49. N 4. P. 154. <https://doi.org/10.1007/s11082-017-0996-5>
16. Amendola V., Pilot R., Frascioni M., Maragò O.M., Iati M.A. Surface plasmon resonance in gold nanoparticles: A review // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2017. V. 29. N 20. P. 203002. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa60f3>
17. Nikitin I.Y., Nabiullina R.D., Borodina L.N., Starovoytov A.A., Gladskikh I.A. Optical properties of a hybrid films of J-aggregates and aluminum oxide formed on an island Ag film // *Proc. of the International Conference Laser Optics (ICLO)*. 2022. <https://doi.org/10.1109/iclo54117.2022.9840201>
10. Liu S., Tian J., Zhang W. Fabrication and application of nanoporous anodic aluminum oxide: A review. *Nanotechnology*, 2021, vol. 32, no. 22, pp. 222001. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abe25f>
11. Kumeria T., Santos A. Nanoporous alumina membranes for chromatography and molecular transporting. *Springer Series in Materials Science*, 2015, vol. 219, pp. 293–318. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20334-8_10
12. Alekseeva N., Cema G., Podorozhkin D., Solovyev V., Trifonov S., Veisman V. Physical properties of self-assembled porous alumina structures filled with iodine. *Journal of Self-Assembly and Molecular Electronics (SAME)*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 27–40. <https://doi.org/10.13052/jsame2245-4551.212>
13. Yin H., Li X., Que L. Fabrication and characterization of aluminum oxide thin film micropatterns on the glass substrate. *Microelectronic Engineering*, 2014, vol. 128, pp. 66–70. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2014.05.020>
14. Nabiullina R.D., Nikitin I., Soloveva E., Gladskikh I., Starovoytov A.A. Optical properties of nanoporous aluminum oxide activated by molecular clusters of pseudocyanine dye. *Proceedings of SPIE*, 2022, vol. 12131, pp. 121310S. <https://doi.org/10.1117/12.2621343>
15. Toropov N.A., Gladskikh I.A., Parfenov P.S., Vartanyan T.A. Fabrication and laser-assisted modification of the Ag particles ensembles supporting quadrupole plasmon oscillations. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, vol. 49, no. 4, pp. 154. <https://doi.org/10.1007/s11082-017-0996-5>
16. Amendola V., Pilot R., Frascioni M., Maragò O.M., Iati M.A. Surface plasmon resonance in gold nanoparticles: A review. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2017, vol. 29, no. 20, pp. 203002. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa60f3>
17. Nikitin I.Y., Nabiullina R.D., Borodina L.N., Starovoytov A.A., Gladskikh I.A. Optical properties of a hybrid films of J-aggregates and aluminum oxide formed on an island Ag film. *Proc. of the International Conference Laser Optics (ICLO)*, 2022. <https://doi.org/10.1109/iclo54117.2022.9840201>

Авторы

Никитин Игорь Юрьевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-7911-9092>, nikitinigor512@gmail.com

Нобиуллина Резида Даниловна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-1891-3057>, rezida2105@mail.ru

Нашекин Алексей Викторович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-2542-7364>, nashchekin@mail.ioffe.ru

Старовойтов Антон Андреевич — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-2160-1281>, Anton.starovoytov@gmail.com

Гладских Игорь Аркадьевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-6389-1611>, 138020@mail.ru

Authors

Igor Yu. Nikitin — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7911-9092>, nikitinigor512@gmail.com

Rezida D. Nabiullina — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1891-3057>, rezida2105@mail.ru

Alexey V. Nashyokin — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2542-7364>, nashchekin@mail.ioffe.ru

Anton A. Starovoytov — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2160-1281>, Anton.starovoytov@gmail.com

Igor A. Gladskikh — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-6389-1611>, 138020@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.08.2022

Одобрена после рецензирования 06.11.2022

Принята к печати 15.01.2023

Received 18.08.2022

Approved after reviewing 06.11.2022

Accepted 15.01.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»